

---

# ANZEIGE- UND INTERAKTIONSKONZEPTE FÜR HEAD-MOUNTED DISPLAYS IM FAHRZEUG

---

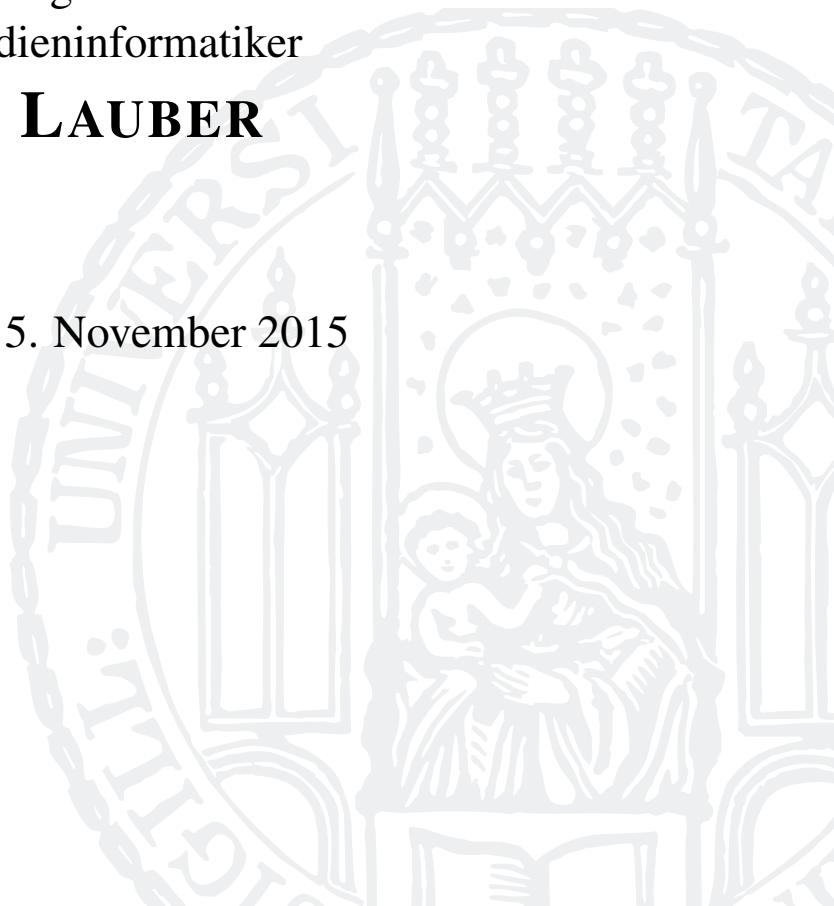
## DISSERTATION

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von  
Diplom-Medieninformatiker

**FELIX LAUBER**

München, den 5. November 2015



Erstgutachter: Prof. Dr. Andreas Butz  
Zweitgutachterin: Prof. Dr. Gudrun Klinker

Tag der mündlichen Prüfung: 15.03.2016



## ZUSAMMENFASSUNG

Head-Up Displays werden immer mehr in Fahrzeugen eingesetzt, da sie im Vergleich zu etablierten Head-down Displays Vorteile in Bezug auf Blickabwendung und Akkommodationszeiten haben können. Allerdings stehen dem gegenüber auch Schwächen wie ein hoher Verkaufspreis, hohe Anforderungen an die Fahrzeugarchitektur und eine beschränkte Anzahl an darstellbaren Anwendungsfällen. Als Head-Mounted Displays werden Displays bezeichnet, mit denen Anzeigen ebenfalls halbtransparent über der Realität dargestellt werden können, die jedoch wie eine Brille am Kopf des Fahrers getragen werden. Im Gegensatz zu Head-Up Displays sind diese unabhängig vom Fahrzeug einsetzbar und dazu in der Lage eine wesentlich größere Bandbreite an Anwendungen darzustellen.

Sollten Head-Mounted Displays ein elektronischer Massenartikel werden, so werden Endverbraucher diese auch im Fahrzeug nutzen wollen. Da die virtuellen Inhalte im primären Sichtfeld des Fahrers angezeigt werden, wird es schwieriger Beeinträchtigungen der Fahraufgabe zu verhindern. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher untersucht, unter welchen Voraussetzungen Head-Mounted Displays im Fahrzeug genutzt werden können, so dass die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer gewährleistet bleibt und Fahrer von dieser Technologie optimal profitieren können.

Im Grunde sind Head-Mounted Displays schon seit Ende der 1960er Jahre bekannt und seitdem Gegenstand der Forschung. Obwohl sie, genau wie Head-Up Displays, bereits seit langem in der Luftfahrtindustrie erfolgreich eingesetzt werden, wurde deren Verwendung für fahrbegleitende Anzeigen im Automobil jedoch nie ernsthaft in Betracht gezogen.

Die Frage, wie Head-Mounted Displays im Fahrzeug sicher und gewinnbringend genutzt werden können, wird in dieser Arbeit in zwei Schritten beantwortet. In einem ersten Schritt, werden anhand von Grundlagenuntersuchungen spezifische Eigenschaften, Vor- und Nachteile der Displaytechnologie in Bezug auf die **Anzeige** von Information untersucht. In einem zweiten Schritt widmet sich die Arbeit der Frage, wie mit den angezeigten Informationen am besten **interagiert** werden sollte.

Diese beiden Fragestellungen wurden im Rahmen von Nutzerstudien untersucht. In diesem Zusammenhang entstand neben einer Reihe von erlebbaren Prototypen unter anderem auch eine Methode zur schnellen, prototypischen Umsetzung von Anzeigekonzepten für Head-Mounted Displays.

Letztlich wird in dieser Arbeit dargelegt, dass sich Head-Mounted Displays grundsätzlich für die Darstellung fahrbegleitender Anzeigen eignen können. Es wird nachgewiesen, dass es Situationen gibt, in denen diese Display-Technologie sogar inhärente Vorteile gegenüber etablierten Anzeigen im Fahrzeug hat. Weiterhin werden potenzielle Gefahrenquellen identifiziert und Lösungsansätze aufgezeigt. Außerdem werden Interaktionskonzepte entwickelt, die sich die Vorteile dieser Anzeigetechnologie zunutze machen. Hierbei werden Einflüsse unterschiedlicher Interaktionsmodalitäten und deren Wechselwirkungen mit Anzeigeparametern sowie der Fahraufgabe untersucht. Abschließend werden ausgehend von den Erfahrungen, die in dieser Arbeit gemacht wurden, Handlungsempfehlungen für Konzeptentwickler abgeleitet und konkrete Forschungsfragen für zukünftige Arbeiten formuliert.



## ABSTRACT

Head-up displays are increasingly being used in vehicles, as they have advantages in eye accommodation and gaze diversion times compared to established head-down displays. However, they also have weaknesses such as high retail prices, high demands on vehicle architecture and a limited number of displayable use cases.

Head-mounted displays are additionally able to augment the real world with semi-transparent content, but are worn like glasses by the driver. In contrast to head-up displays, they can be used independent of the vehicle and are capable of displaying a substantially broader range of use cases.

If head-mounted displays become a common consumer electronics product, end users may also use them in cars. As content is displayed in their primary field of vision, it becomes difficult to prevent it from interfering with the driving task. In this thesis, we examine how head-mounted displays can be used in vehicles while ensuring the safety of all traffic participants and enabling the driver to optimally profit from the technology.

Head-mounted displays have been known since the late 1960s and have, since then, been a constant object of research. Like head-up displays, they have been utilized in the aerospace industry. Despite this, their usage for driving related content in automobiles has never been seriously considered.

This thesis researches the question of how head-mounted displays can be safely and beneficially used in vehicles. In the first of two steps, we conducted fundamental studies to examine specific characteristics, advantages and disadvantages of **displaying** information with the display technology. In the second step, this thesis addresses the question of how the user should ideally **interact** with the displayed information.

To solve these two main research questions, we conducted a series of user studies. In this context, we created a broad range of high fidelity prototypes and, among other things, a new method for prototyping user interfaces for head-mounted displays.

In this thesis, we ultimately conclude that head-mounted displays can be suitable for displaying driving related content. We prove that there are situations in which this display technology has inherent advantages in contrast to established in-vehicle displays. Furthermore, we identify potential sources of danger and point out possible solutions. We also develop interaction concepts, which profit from the advantages of the display technology. These concepts are used to examine the influence of different interaction modalities, as well as their interplay with various display parameters and the driving task. Based on the experiences made during this work, we finally formulate a set of recommendations for concept developers as well as specific research questions for future work.



## VORWORT

Diese Dissertation ist das Ergebnis der Projekte, die unter meiner Verantwortung zwischen Februar 2012 bis Januar 2015 entstanden sind. Alle Projekte wurden bei der BMW Group Forschung und Technik GmbH in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Mensch-Maschine Interaktion der Ludwig-Maximilian-Universität München durchgeführt.

Wie jede Doktorarbeit konnte auch diese nicht ohne die Hilfe und Unterstützung Anderer entstehen. Daher sind die Entscheidungen und Ergebnisse auch ein Produkt zahlloser Diskussionen mit Kollegen, Betreuern, anderen Doktoranden und Studenten. Insbesondere die Abschlussarbeiten, die von einigen Studenten unter meiner Betreuung durchgeführt wurden, tragen erheblich zu dieser Arbeit bei. In mehreren Fällen waren die hierbei entwickelten Konzepte und Studienergebnisse auch Gegenstand wissenschaftlicher Publikationen, was gegebenenfalls durch eine entsprechende Mitautorenschaft gekennzeichnet ist. Um eine eindeutige Zuordnung zu gewährleisten, wird jedem Abschnitt dieser Dissertation, der bereits veröffentlichte Inhalte zum Gegenstand hat, eine entsprechende Erklärung vorangestellt.



## DANKSAGUNGEN

Die vorliegende Arbeit ist über einen Zeitraum von drei Jahren entstanden und wäre ohne die Hilfe und Unterstützung vieler Menschen nicht möglich gewesen:

Zuallererst und ganz besonders möchte ich meinem Betreuer **Andreas Butz** danken. Er hat sich immer viel Zeit für fachliche und organisatorische Fragen genommen und mich unterstützt, wo immer es ihm möglich war. Bei einer Doktorarbeit, die in Kooperation mit einem großen Unternehmen entsteht, können besonders auf organisatorischer Seite immer wieder herausfordernde Situationen auftreten. Hier konnte ich mich immer auf die uneingeschränkte Unterstützung und Kompromissbereitschaft verlassen. Danke!

Vielen Dank auch an die weiteren Mitglieder meines Prüfungskomitees **Gudrun Klinker**, **Peer Kröger** und **Hans Jürgen Ohlbach**.

Mein besonderer Dank gilt auch meinen Kollegen, die mich immer wieder fachlich herausgefordert haben und mit vielen Diskussionen und konstruktiver Kritik zu einem umfassenden Verständnis des Themas beigetragen haben. Besonders möchte ich mich hier bei **Wolfgang Spießl** bedanken, der mir geholfen hat mich bei BMW zurecht zu finden und mich mit fachlichem Feedback von unschätzbarem Wert unterstützt hat. Mein besonderer Dank gilt auch meinen Kollegen **Julia Niemann**, **Sonja Rümelin** und **Martin Knobel** dafür, dass ich trotz aller Anstrengungen und Rückschläge, die so eine Dissertation mit sich bringt, den Spaß an der Arbeit nie verloren habe. Ich danke weiterhin **Sebastian Hergeth** für zahlreiche kulinarische Ereignisse und **Philipp Kerschbaum** für sein „schlacksiges Management“. Mein Dank gilt auch den übrigen Mitgliedern des AR-Teams, insbesondere **Jochen Pfannstiel** und **Michi Gräf**. Vielen Dank auch an **Verena Zelger** für ihre endlose Geduld bei der Abwicklung meiner Dienstreisen und ihre uneingeschränkte Hilfsbereitschaft. Außerdem bedanke ich mich bei meinen beiden Teamleitern **Bernhard Niedermaier** und **Ronee Chadowitz**, dass sie mir die Arbeit an meiner Dissertation ermöglicht haben und für die fachlichen Freiheiten, die sie mir eingeräumt haben. Danke auch an **Michael Heimrath** dafür, dass ich auf seine Unterstützung zählen konnte, als es notwendig war.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeitern der Forschungsgruppen Medieninformatik und Mensch-Maschine-Interaktion der LMU. Danke für die tolle Zeit und das Feedback bei den IDCs, danke auch an **Franziska Schwamb** für ihre Hilfe bei allen organisatorischen Fragen und das Aufbewahren aller ACM-Zeitschriften.

Ich bedanke mich außerdem bei allen Studenten, die mich im Rahmen von Bachelor- oder Masterarbeiten bei meinen Arbeiten unterstützt haben. In chronologischer Reihenfolge waren dies: **Anna Follmann**, **Johannes Franz**, **Claudius Böttcher**, **Cornelius Back**, **Sophia Cook** und **Felix Praschak**.

Ich bedanke mich auch bei meinen Eltern **Ulrike Lauber** und **Horst Lauber** dafür, dass sie mir immer den Rücken freigehalten haben. Mein besonderer Dank gilt auch **Alison Wade**: Danke, dass du so ein fürsorglicher und positiver Mensch bist, danke, dass Du mich auch morgens aushältst und danke für Deine Hilfe bei englischsprachigen Publikationen.





# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Problemstellung und Forschungsfragen . . . . .	3
1.3 Forschungsansatz . . . . .	5
1.4 Forschungsbeitrag . . . . .	5
1.4.1 Eingrenzung eines Design Space für die Benutzung von Datenbrillen im Fahrzeug . . . . .	6
1.4.2 Prototypische Entwicklung von Anwendungen für Datenbrillen im Fahrzeug . . . . .	6
1.4.3 Informationsanzeige – Effekte und Potenziale . . . . .	6
1.4.4 Interaktive Prototypen – Effekte von Bedienmodalität und Anzeigereferenz auf Interaktions- und Fahrverhalten . . . . .	7
1.4.5 Empfehlungen für die Benutzung von Datenbrillen im Fahrzeug . . . . .	7
1.5 Struktur der Arbeit . . . . .	8
<b>2 Hintergrund</b>	<b>11</b>
2.1 Grundlagen der Mensch-Maschine Interaktion im Fahrzeug . . . . .	11
2.1.1 Aufgaben eines Fahrzeugführers . . . . .	11
2.1.2 Grundlagen des menschlichen Sehens . . . . .	15
2.1.3 Informationsanzeige und Auswirkungen auf den Fahrer . . . . .	16
2.1.4 Interaktion mit Nebenaufgaben und Auswirkungen auf die Fahraufgabe . . . . .	18
2.1.5 Messmethoden . . . . .	19
2.2 Head-Up Displays im Fahrzeug . . . . .	24
2.2.1 Informationsdarstellung im primären Sichtfeld des Fahrers . . . . .	24
2.2.2 Interaktion mit Inhalten auf Head-Up Displays . . . . .	27
2.3 Mixed Reality und Head-Mounted Displays . . . . .	28
2.3.1 Augmented Reality und Mixed Reality . . . . .	28
2.3.2 Head-Mounted Displays: Designs und Folgen für die Benutzung . . . . .	30
2.3.3 Referenzkoordinatensysteme . . . . .	32
2.3.4 Mensch-Maschine Interaktion auf einer Datenbrille . . . . .	33
2.4 Anwendungsbereiche von Datenbrillen . . . . .	36
2.4.1 Verwendung von Head-Mounted Displays in der Industrie und Luftfahrt . . . . .	36

2.4.2	Datenbrillen im Fahrzeug . . . . .	37
2.5	Fokus dieser Arbeit . . . . .	38
2.5.1	Anzeige . . . . .	38
2.5.2	Interaktion . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Konzeption, Entwicklung und Evaluation der Konzepte</b>	<b>43</b>
3.1	Konzeption und erster Prototyp . . . . .	43
3.1.1	Motivation . . . . .	44
3.1.2	Prinzip . . . . .	45
3.1.3	Diskussion . . . . .	47
3.2	Schnelle Prototypenentwicklung in virtuellen Cockpits . . . . .	48
3.2.1	Motivation . . . . .	48
3.2.2	Prinzip . . . . .	49
3.3	Evaluationsumgebungen . . . . .	51
3.3.1	Studiendurchführung im Simulator . . . . .	51
3.3.2	Evaluationsumgebungen . . . . .	52
3.3.3	Head-Mounted Displays . . . . .	54
3.3.4	Tracker . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Informationsanzeige</b>	<b>57</b>
4.1	Fahrerunterstützende Anzeigen auf dem Head-Mounted Display (HMD) . . .	58
4.1.1	Motivation und Untersuchungsgegenstand . . . . .	58
4.1.2	Studie . . . . .	59
4.1.3	Diskussion . . . . .	64
4.2	Anzeigeort, Anzeigegröße und Anzeigemenge . . . . .	66
4.2.1	Motivation und Untersuchungsgegenstand . . . . .	66
4.2.2	Studie I: Anzeigeposition und -Größe . . . . .	67
4.2.3	Studie II: Informationsmenge . . . . .	76
4.3	Warnungen auf dem HMD . . . . .	83
4.3.1	Motivation und Untersuchungsgegenstand . . . . .	83
4.3.2	Studie I . . . . .	84
4.3.3	Studie II . . . . .	88
4.3.4	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	90
4.4	Kopfdrehung als Situationsindikator . . . . .	91
4.4.1	Motivation . . . . .	91
4.4.2	Konzept . . . . .	92
4.4.3	Vorstudie: Vergleich der Konzeptvarianten . . . . .	96
4.4.4	Hauptstudie: Vergleich mit dem Stand der Technik . . . . .	101
4.4.5	Diskussion . . . . .	104
<b>5</b>	<b>Interaktionstechniken</b>	<b>107</b>
5.1	Indirekte Interaktion durch Blickgesten . . . . .	108

5.1.1	Motivation . . . . .	108
5.1.2	Konzept . . . . .	109
5.1.3	Studie . . . . .	111
5.1.4	Diskussion . . . . .	115
5.2	Zeige- und Touchgesten vor der Mittelkonsole . . . . .	117
5.2.1	Vorüberlegungen . . . . .	118
5.2.2	Konzeptvarianten . . . . .	121
5.2.3	Anwendungsfall und Prototyp . . . . .	123
5.2.4	Vorstudie: Vergleich der Konzeptvarianten . . . . .	123
5.2.5	Hauptstudie: Vergleich mit direkter Touch-Interaktion . . . . .	128
5.2.6	Diskussion . . . . .	134
5.3	Zeigegesten und ein physikalischer Controller in der Mittelkonsole . . . . .	135
5.3.1	Konzept . . . . .	136
5.3.2	Evaluation . . . . .	139
5.3.3	Diskussion . . . . .	146
5.4	Indirekte Interaktion am Lenkrad via Touchpad und Lenkradtasten . . . . .	149
5.4.1	Motivation . . . . .	149
5.4.2	Konzept . . . . .	150
5.4.3	Studie . . . . .	154
5.4.4	Ergebnisse: Evaluation des Anzeige- und Bedienkonzepts . . . . .	156
5.4.5	Ergebnisse: Evaluation der Reaktionszeiten . . . . .	160
5.4.6	Diskussion . . . . .	160
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>163</b>
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	163
6.1.1	Anzeige von Inhalten . . . . .	163
6.1.2	Interaktion mit Inhalten . . . . .	167
6.2	Schlussfolgerungen . . . . .	169
6.2.1	Anzeigeposition und Anzeigereferenz . . . . .	169
6.2.2	Adaptivität und Unterbrechbarkeit . . . . .	170
6.2.3	Mehrwert und Ablenkungspotenzial . . . . .	171
6.2.4	Indirekte Interaktion mit Inhalten auf der Datenbrille . . . . .	172
6.2.5	Anwendungsfälle . . . . .	173
6.2.6	Fazit . . . . .	174
6.3	Ausblick . . . . .	174
	<b>Literatur</b>	<b>177</b>



# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Mercedes Instrumententafel Ende der 1970er Jahre und im Jahre 2014 . . .	1
2.1	Das Zusammenspiel der Anforderungen aus Primär-und Sekundäraufgabe .	12
2.2	Die vom Fahrer aufgebrachte und von der Verkehrssituation benötigte Aufmerksamkeit bei einem aufmerksamen und abgelenkten Fahrer . . . . .	13
2.3	Bildschirm in der Mittelkonsole zur Anzeige von IVIS im Audi A6, Porsche 911 Targa und BMW i3 . . . . .	17
2.4	Kombiinstrument im Volvo XC90, Tesla Model S und VW Passat (2015) . .	17
2.5	Der Peripheral Detection Task – Reizpositionen . . . . .	23
2.6	Das <i>HUD Benefit Time Window</i> nach Kiefer . . . . .	25
2.7	Das Reality-Virtuality (RV) Continuum nach Milgram [109]. Grafik aus [109]. . . . .	29
2.8	Interaktion in unterschiedlichen Paradigmen der Mensch-Maschine Interaktion nach Rekimoto [133]. Grafik aus [133]. . . . .	33
2.9	Referenzsysteme in einem Fahrzeug . . . . .	39
3.1	Die Hintergrundszene wird aus der Fahrerperspektive maßstabsgetreu auf Papier gedruckt. Auf einer darübergelegten Folie wird der Anzeigebereich der später verwendeten Datenbrille eingezeichnet (rotes Rechteck). Abbildung veröffentlicht in [83]. . . . .	46
3.2	Kopfstabile Inhalte werden direkt auf die Folie gezeichnet. Bei einem Verschieben der Folie (entspricht Kopfdrehung) bleiben diese im Blickfeld. Abbildung veröffentlicht in [83]. . . . .	46
3.3	Fahrzeugstabile Inhalte werden auf das Papier mit dem Hintergrund gezeichnet. Bei einem Verschieben der Folie (entspricht Kopfdrehung) bleiben diese an derselben Position in Relation zur Umgebung. Abbildung veröffentlicht in [83]. . . . .	47
3.4	Nachstellung einer Parksituation in Unity 3D. Unterschiedlich positionierte Kameras bieten sowohl einen Überblick über die Szene als auch die Möglichkeit die Perspektive des Fahrers einzunehmen. . . . .	50
3.5	Bildausschnitt, der im Anzeigebereich der Brille sichtbar ist. Eventuelle Verdeckungs- oder Darstellungsprobleme der fahrzeug- und kopfstabiler Inhalte können so schnell identifiziert werden. . . . .	50
3.6	Mögliche HUD Aufbauten im Usability Lab. . . . .	53
3.7	HUD-Aufbau mit auf dem Dach der Sitzkiste befestigten Bildschirm und Teilerspiegel im Statischen Simulator. . . . .	53
3.8	Funktionsprinzip der Vuzix Star 1200 Datenbrille . . . . .	54
3.9	Funktionsprinzip der LUMUS DK-32 und DK-31 Datenbrille . . . . .	55
3.10	Links das Smarttrack-System der Firma ART [5], rechts ein auf ein Kopfband montiertes GT-5 Target. . . . .	56
4.1	Anzeigeinhalte in der ersten Studie. . . . .	58

4.2	Vekehrsspezifische Situationen. . . . .	59
4.3	Unterschiede zwischen den Anzeigemodalitäten bezüglich körperlicher Beeinträchtigungen . . . . .	62
4.4	Subjektive Einschätzung der Anzeigemodalitäten HUD und Datenbrille . . .	62
4.5	Anzeigehalte und mögliche Basis-Anzeigepositionen im ersten Teil der Studie. . . . .	68
4.6	Anzeigepositionen und die kumulierte Rangfolge der Probanden . . . . .	70
4.7	Gründe für oder gegen die Wahl einer Anzeigeposition. . . . .	71
4.8	Ergebnisse der freien Positionswahl (grüne Markierungen) mit gemittelter Favoritenposition (rote Markierung). . . . .	71
4.9	Die Anzeigehalte während des zweiten Teils der Untersuchung. . . . .	73
4.10	Favoritenpositionen aller Probanden für das Stadt-Szenario und das Autobahn-Szenario . . . . .	74
4.11	Gründe für die Positionswahl der Probanden beiden Szenarios. . . . .	74
4.12	Gründe für die Wahl der Anzeigengröße durch die Probanden beiden Szenarios. . . . .	75
4.13	Visueller Suchtask mit sechs textuellen und symbolischen Anzeigeelementen . . . . .	77
4.14	SDLP-Werte in Abhängigkeit der Anzahl der gleichzeitig angezeigten Inhalte und der Ausgabemodalität. . . . .	79
4.15	Durchschnittliche Anzahl der bearbeiteten Aufgaben in Abhängigkeit der Menge und Art der angezeigten Inhalte für die Datenbrille. . . . .	79
4.16	Durchschnittliche Anzahl der bearbeiteten Aufgaben in Abhängigkeit der Menge und Art der angezeigten Inhalte für das HUD. . . . .	80
4.17	Nennungen der Probanden, wie viele Inhalte maximal gleichzeitig auf den verschiedenen Ausgabemodalitäten angezeigt werden dürfen. . . . .	81
4.18	Rangfolgenbildung für die verschiedenen Kombinationen aus Ausgabemodalität und Inhaltsart . . . . .	82
4.19	Bildschirminhalt bei der SuRT-Nebenaufgabe . . . . .	84
4.20	Die in der Datenbrille bzw. im HUD angezeigte Ausweichempfehlung und Bremsaufforderung. . . . .	86
4.21	Durchschnittliche Reaktionszeiten beim Anzeigen der Warnung auf der Datenbrille (HMD) und dem HUD. . . . .	87
4.22	Im Abschlussfragebogen wurden Probanden nach ihrer bevorzugten Ausgabemodalität in drei Kategorien befragt. In allen Kategorien war das Antwortverhalten sehr ausgeglichen. . . . .	87
4.23	Im zweiten Versuch wird zusätzlich zur Warnung eine rechteckige Markierung angezeigt. Diese ist auch sichtbar wenn keine Warnung angezeigt wird (linke Seite) und markiert genau den Bereich, in dem eine Warnung erscheinen kann (rechte Seite). . . . .	88
4.24	Durchschnittliche Reaktionszeiten beim Anzeigen der Warnung auf der Datenbrille (HMD) und dem HUD im zweiten Versuch. Der Unterschied der Reaktionszeiten ist signifikant. . . . .	89

4.25	Im Abschlussfragebogen wurden Probanden erneut nach ihrer bevorzugten Ausgabemodalität in drei Kategorien befragt. Der Unterschied in der Kategorie Aufmerksamkeit ist signifikant ( $p < 0,05$ ). . . . .	90
4.26	Fahrzeugstabile (linke Seite) und kopfstabile (rechte Seite) Inhalte ausgedrückt durch die Rotation einer virtuellen Szenenkamera (cr) in Abhängigkeit der Rotation des Kopfes (hr) um die gleiche Achse. . . . .	92
4.27	Die Aufteilung des Sichtfelds in Zonen. . . . .	93
4.28	Die Abbildungsfunktionen der Konzepte <i>Magnetic HUD</i> , <i>Relocate HUD</i> und <i>Alpha-blending HUD</i> . . . . .	94
4.29	Anzeigen bei einer Kopfdrehung um die y-Achse bei dem Konzept <i>Magnetic HUD</i> . . . . .	95
4.30	Anzeigen bei einer Kopfdrehung um die y-Achse bei dem Konzept <i>Relocate HUD</i> . . . . .	95
4.31	Anzeigen bei einer Kopfdrehung um die y-Achse bei dem Konzept <i>Alpha-blending HUD</i> . . . . .	95
4.32	Ergebnisse der Fragebögen mit signifikant unterschiedlichen Paaren (mit einem (*) gekennzeichnet). . . . .	98
4.33	Die Geschwindigkeit der Transition und die Ablesbarkeit der Inhalte. . . . .	99
4.34	Der Zeitpunkt, an dem die Transition beginnt. . . . .	99
4.35	Potenzial Elemente der Umgebung des Fahrers durch Anzeigen zu verdecken. . . . .	100
4.36	Antwortverhalten der Probanden für die Kategorien „Unruhe der Anzeigen“, „Dauer der Blickabwendung“ und „Verdeckung von Fahrzeugelementen“. Signifikante Unterschiede zwischen den Anzeigemodalitäten sind mit einem (*) gekennzeichnet ( $p < 0,05$ ). . . . .	102
4.37	Antwortverhalten der Probanden für die Kategorien „Verkehrsgeschehen im Blick“ und „Ablesbarkeit der Anzeigen“. Signifikante Unterschiede zwischen den Anzeigemodalitäten sind mit einem (*) gekennzeichnet ( $p < 0,05$ ). . . . .	103
4.38	Antwortverhalten der Probanden für die Kategorien „Ablenkung“ und „Verdeckung von Objekten der Außenwelt“. . . . .	103
5.1	Blickt der Nutzer nach rechts oben, so wird für einen Zeitraum von fünf Sekunden ein Videobild einer nach hinten gerichteten Kamera eingeblendet. . . . .	110
5.2	Erhält der Nutzer einen Anruf, so kann er diesen entweder annehmen (Blick nach links) oder ablehnen (Blick nach rechts). . . . .	110
5.3	Der Nutzer kann Nachrichten, die am oberen Rand des Anzeigebereichs als Miniatur abgebildet sind, durch einen Blick nach oben zunächst vergrößert anzeigen. Anschließend kann er durch Blicke nach links oder rechts durch die verfügbaren Nachrichten blättern. . . . .	111
5.4	Im Anwendungsfall <i>BinaryUI</i> kann eine komplette Menüstruktur nur durch zwei Blickgesten (rechts und links) bedient werden. . . . .	111
5.5	Prototyp bestehend aus monokularer LUMUS DK-31 Datenbrille und einer Logilink-Kamera, die auf das Auge des Nutzers gerichtet ist. . . . .	112
5.6	SDLP-Werte für alle Konzepte. . . . .	114
5.7	Subjektive Bewertung des Systems bezüglich Blickabwendung, Ablenkung und der notwendigen Amplitude der Augenbewegung. . . . .	114

5.8	Antworten der Probanden in den subjektiven Fragebögen. . . . .	115
5.9	Rangfolgenbildung der Anwendungsfälle. Wilcoxon-Vergleiche mit einem p-Wert unter 0,05 sind mit einem (*) gekennzeichnet. . . . .	116
5.10	Zustandsdiagramm des Systems. Abbildung in Anlehnung an [25]. . . . .	119
5.11	Cursor-Visualisierung mit Radius (r) in Abhängigkeit von der Distanz (d) zum Bildschirm. . . . .	120
5.12	Systemverhalten des Konzepts <i>Hover and Touch</i> . . . . .	121
5.13	Systemverhalten des Konzepts <i>Hover and Click</i> . . . . .	121
5.14	Systemverhalten des Konzepts <i>Slide and Lift</i> . . . . .	122
5.15	Systemverhalten des Konzepts <i>Slide and Click</i> . . . . .	122
5.16	Aufbau in der Hauptstudie. Links der Hardware-Aufbau. Rechts die Fahrerperspektive durch das HUD auf die Fahrszene. . . . .	124
5.17	Die sechs Bedingungen in der Vorstudie. . . . .	124
5.18	Die sechs Bedingungen in der Hauptstudie. . . . .	128
5.19	Aufbau in der Hauptstudie. Links die Position der Kinect im Verhältnis zum Touchscreen. Rechts die Fahrerperspektive durch das HUD auf die Fahrszene. . . . .	129
5.20	Daten der Längsführung. Die Standardabweichung der Distanz zum Vorderfahrzeug ist als graue Linie dargestellt (rechte y-Achse), die der Geschwindigkeit als schwarze Balken (linke y-Achse). Die signifikant verschiedenen Paare sind mit einem x (Distanz) und einem * (Geschwindigkeit) gekennzeichnet. . . . .	130
5.21	Daten der Sekundäraufgabe. Die durchschnittliche Zeit pro Tastendruck wird durch die graue Linie (rechte y-Achse), die durchschnittliche Fehleranzahl pro Aufgabe durch die schwarzen Balken (linke y-Achse) gekennzeichnet. Signifikant verschiedene Paare wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gekennzeichnet (siehe Text). . . . .	131
5.22	Subjektive Auslastung (NASA RTLX) für die einzelnen Bedingungen. Die signifikant verschiedenen Paare sind mit einem * gekennzeichnet. . . . .	132
5.23	Daten der Querführung. Die signifikant verschiedenen Paare sind mit einem * gekennzeichnet. . . . .	132
5.24	Einordnung der Systeme in eine Rangordnung. Die signifikant verschiedenen Paare sind mit einem * gekennzeichnet. . . . .	133
5.25	Mittelkonsole mit erhöhter Armstütze, Dreh-Drücksteller und daneben positioniertem Leap-Motion Controller. . . . .	137
5.26	Wechsel der Audio-Quelle und Lautstärkeregelung . . . . .	138
5.27	Zugriff auf persönliche Nachrichten. . . . .	138
5.28	Information über Verkehrsbeeinträchtigungen und gegebenenfalls Änderungsmöglichkeit der Route. . . . .	139
5.29	Annehmen oder Ablehnen eines eingehenden Anrufs. . . . .	139
5.30	Werte für SDLP und Standardabweichung des Abstands zum Vorderfahrzeug für die verschiedenen Stabilisierungstechniken. . . . .	142
5.31	Bearbeitungsgeschwindigkeit der Aufgaben bei den verschiedenen Stabilisierungstechniken. Signifikant unterschiedliche Paare sind mit einem (*) gekennzeichnet. . . . .	142



5.32	Durchschnittliche Fehleranzahl bei der Bearbeitung der Aufgaben für die verschiedenen Stabilisierungstechniken. . . . .	143
5.33	Werte für NASA RTLX und SUS für die verschiedenen Stabilisierungstechniken. Mit einem (*) gekennzeichnete Paare sind für beide abhängigen Variablen signifikant verschieden. . . . .	143
5.34	Bearbeitungsgeschwindigkeit der Aufgaben unter Verwendung der verschiedenen Eingabemodalitäten. Die mit einem (*) gekennzeichnete signifikant unterschiedliche Paarung gilt für die Querführung (SDLP). . . . .	144
5.35	Bearbeitungsgeschwindigkeit der Aufgaben mit den verschiedenen Eingabemodalitäten. . . . .	145
5.36	Durchschnittliche Fehleranzahl bei der Bearbeitung der Aufgaben für die verschiedenen Eingabemodalitäten. . . . .	145
5.37	Werte für NASA RTLX und SUS für die verschiedenen Eingabemodalitäten. . . . .	146
5.38	Probandeneinschätzungen der Anzeigetechniken bezüglich verschiedener Kategorien. Signifikant unterschiedliche Paare sind mit einem (*) gekennzeichnet. . . . .	147
5.39	Verschiedene Layout-Varianten des Untermenüs. Abbildung nach [124]. . . . .	151
5.40	Interaktion im Hauptmenü. Durchschalten der Elemente durch Drehen am Knurl beziehungsweise Streichen des Fingers entlang der inneren Kante des Touchpads. Abbildung nach [124]. . . . .	152
5.41	Interaktion im Hauptmenü. Durchschalten der Elemente durch Drehen am Knurl beziehungsweise Streichen des Fingers entlang der inneren Kante des Touchpads. Abbildung nach [124]. . . . .	153
5.42	Indirekte Interaktion mit der Tastatur. Der Nutzer bewegt einen virtuellen Cursor auf eine Taste indem er eine entsprechende Bewegung (roter Punkt) ausführt. Der Buchstabe wird ausgewählt indem der Nutzer seinen Finger vom Touchpad abhebt. . . . .	154
5.43	Die durchschnittliche Bearbeitungszeit des Sekundärtasks für die Bedienmodalitäten. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (*) gekennzeichnet. . . . .	157
5.44	Die durchschnittliche Einstufung der Eingabemodalitäten bezüglich subjektiv wahrgenommener Arbeitslast. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (*) gekennzeichnet. . . . .	157
5.45	Die Bewertung der Probanden in den Fragebögen. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (*) gekennzeichnet. . . . .	158
5.46	Die Bewertung der Probanden im Abschlussfragebogen. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (*) gekennzeichnet. . . . .	159
5.47	Die Reaktionszeiten der Probanden unter Verwendung der verschiedenen Ausgabemodalitäten. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (*) gekennzeichnet. . . . .	160
6.1	Kopf- und (vestibulare) Augenbewegungen während des Autofahrens. Abbildung aus [95]. . . . .	176



# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>AAM</b>	Alliance of Automobile Manufacturers
<b>ACC</b>	Active Cruise Control
<b>ADAS</b>	Advanced Driver Assistance Systems
<b>AR</b>	Augmented Reality
<b>AV</b>	Augmented Virtuality
<b>CID</b>	Central Information Display
<b>DALI</b>	Driving Activity Load Index
<b>FOV</b>	Field of View
<b>TIR</b>	Total Internal Reflection
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HUD</b>	Head-Up Display
<b>HMD</b>	Head-Mounted Display
<b>IVIS</b>	In Vehicle Information Systems
<b>LCD</b>	Liquid Chrystal Display
<b>MFL</b>	Multifunktionslenkrad
<b>M</b>	Mean (Mittelwert)
<b>MR</b>	Mixed Reality
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>NASA TLX</b>	National Aeronautics and Space Administration (NASA) Task Load Index
<b>NASA RTLX</b>	NASA Raw Task Load Index
<b>NHTSA</b>	National Highway Traffic Safety Administration
<b>PDT</b>	Peripheral Detection Task
<b>SAGAT</b>	Situation Awareness Global Assessment Technique
<b>SEEV Model</b>	Salience, Effort, Expectancy, Value Model
<b>SD</b>	Standard Deviation (Standardabweichung)
<b>SDLP</b>	Standard Deviation of Lateral Position
<b>SUS</b>	System Usability Scale
<b>ZBE</b>	Zentrales Bedienelement



# Kapitel 1

---

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Das Auto ist nicht nur ein Verkehrsmittel, sondern immer mehr auch ein Rückzugsraum, in dem viele Menschen einen nicht unerheblichen Teil ihres Lebens verbringen [147]. Die rasant fortschreitende Technologie und die veränderten Bedürfnisse der Menschen immer und überall auf Informations-, Kommunikations- und Unterhaltungsangebote zugreifen zu können, haben dabei zu einer massiven Veränderung des Erscheinungsbildes im Fahrzeuginnenraum geführt (vergleiche Abbildung 1.1).



**Abbildung 1.1:** Links ein Mercedes SD300 (Baujahr 1978-1980)<sup>1</sup>, auf der rechten Seite eine Mercedes S-Klasse von 2014<sup>2</sup>

Durch die Entwicklung neuer Fahrassistenzsysteme oder auch die zivile Nutzung des Global Positioning System (GPS) besteht einerseits die Notwendigkeit für neue Mensch-Maschine-Schnittstellen im Fahrzeug, um den Fahrer bestmöglich bei der Ausübung der

---

<sup>1</sup> Bildquelle: Jaime Kopchinski, Mercedes 300SD Interior, Taken on December 17, 2009, <https://www.flickr.com/photos/jaimekop/4197435660/in/pool-1170191@N24-jaimekop>

<sup>2</sup> Bildquelle: [www.car-ux.com/Mercedes-Benz](http://www.car-ux.com/Mercedes-Benz), ©Daimler. Mercedes

Fahraufgabe unterstützen zu können. Andererseits müssen auch immer mehr Funktionen, die in keinem direkten Zusammenhang mit der Durchführung der Fahraufgabe stehen, in das Fahrzeug integriert werden. Ein großer Teil der Autofahrer ist nicht bereit während des Aufenthalts im Fahrzeug auf die gewohnte Nutzung von Unterhaltungs-, Informations- und Kommunikationsdiensten zu verzichten. In einer von dem amerikanischen Telekommunikationsunternehmen AT&T in Auftrag gegebenen Studie wurde beispielsweise ermittelt, dass etwa 49% der befragten Pendler während der Fahrt die SMS Funktion ihres Mobiltelefons nutzen obwohl sie sich mehrheitlich darüber im Klaren waren, dass das Schreiben von Kurznachrichten während der Fahrt nicht sicher ist [6]. Tatsächlich gehen Fahrer während einer durchschnittlichen Fahrt 23,5% der Zeit einer Sekundäraufgabe, also einer Aufgabe die nicht für die Durchführung der Fahraufgabe notwendig ist, nach [75].

Ein Ansatz, diese Herausforderungen zu bewältigen, besteht in einer strengen Gesetzgebung, um die Verwendung dieser Systeme in einem Fahrzeug zu regeln. So werden beispielsweise Obergrenzen für die Blickabwendung von der Straße festgelegt [113]. Erfordert die Bedienung eines Systems zu viel visuelle Aufmerksamkeit, wird es für die Verwendung während der Fahrt nicht zugelassen. Diesen Anforderungen begegnet die Automobilindustrie durch den sorgfältigen Einsatz speziell für die Anwendung während der Fahrt entwickelter Ein- und Ausgabetechnologien. Ein Beispiel hierfür ist das Head-Up Display (HUD).

Das HUD ist eine Anzeigetechnologie, bei der das Bild durch eine Projektion in der Windschutzscheibe erzeugt wird. Der Fahrer hat dabei das Gefühl, dass die dargestellten Inhalte in etwa drei Metern Entfernung oberhalb der Motorhaube erscheinen. Letztlich können durch den Einsatz von HUDs die Blickabwendungszeiten effektiv verringert werden [48]. Doch der Einsatz von HUDs ist nicht uneingeschränkt möglich: die Integration erfordert relativ viel Bauraum und Inhalte können nur auf einem dafür festgelegten, relativ kleinen Teil der Windschutzscheibe angezeigt werden. Dadurch ist die Benutzung von HUDs in sehr kleinen Fahrzeugen derzeit nicht möglich und bestimmte Anwendungsfälle können aufgrund der fest vorgegebenen Anzeigengröße oder -position nicht dargestellt werden. Eine Möglichkeit, die gleichen positiven Effekte wie durch den Einsatz von HUDs zu erzielen und gleichzeitig die oben genannten Nachteile zu überwinden, könnte jedoch durch die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Head-Mounted Displays bereitgestellt werden.

Head-Mounted Displays, im deutschen Sprachgebrauch auch Datenbrillen genannt, werden wie eine Brille am Kopf des Nutzers getragen. Mit Hilfe speziell angeordneter Linsen und Spiegel wird hierbei zunächst Licht (meist von der Seite) in das Brillenglas eingebracht und dann durch ein entsprechendes Verfahren in das Auge des Brillenträgers gelenkt. Durchläuft das Licht dabei eine Anzeigeeinheit, wie beispielsweise ein Liquid Chrystal Display (LCD), können virtuelle Bilder im Blickfeld des Nutzers angezeigt werden. Die gesamte optische Konstruktion bleibt dabei zu einem gewissen Anteil durchlässig für das Licht der Umgebung, so dass diese trotzdem sichtbar bleibt und von den virtuellen Informationen überlagert wird. Gleichzeitig kann durch geeignete technische Mittel die Position des Kopfes im Verhältnis zum Fahrzeug bestimmt werden und durch entsprechende Anpassung der virtuellen Informationen beispielsweise ein HUD imitiert werden. Dabei ist jedoch die Anzeige nicht auf einen kleinen Bereich im unteren Teil der Windschutzscheibe beschränkt. Theoretisch kann die gesamte Umgebung, also sowohl der Innenraum

des Fahrzeugs als auch die komplette Außenwelt mit virtuellen Inhalten überlagert werden. Dadurch, dass die Datenbrille nicht im Fahrzeug verbaut ist sondern am Kopf des Nutzers getragen wird, können Inhalte außerdem unabhängig von der Blickrichtung des Nutzers eingeblendet, und durch die Präsenz im direkten Blickfeld vermutlich auch wahrgenommen werden. Weiterhin kann die Datenbrille nahtlos innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs benutzt werden. Vorstellbar ist beispielsweise ein Szenario, in dem der Fahrer mittels Fußgängernavigation zu seinem Fahrzeug geführt wird, in dieses einsteigt und sofort entsprechend veränderte, dem Fahrkontext angepasste Inhalte, angezeigt bekommt. Die Datenbrille benötigt dabei keinerlei Bauraum im Fahrzeug und kann folglich auch in sehr kleinen Fahrzeugen benutzt werden. Dadurch, dass sie vom Benutzer beispielsweise auch in Mietfahrzeugen oder beliebigen weiteren Verkehrsmitteln mitgeführt werden kann, eignet sie sich wohl besonders für den Einsatz in mehrkettigen, multimodalen Verkehrswegen.

Bereits im Jahre 2001 forderte Ronald Azuma, dass nach unzähligen Studien über sehr spezifische Eigenschaften von Head-Mounted Displays, auch anwendungsbezogenere Forschung über deren Einsatz in konkreten Einsatzgebieten folgen müsse [8]. In dieser Dissertation wird die Nutzung von Datenbrillen während der Fahrt näher betrachtet und mögliche Vorteile sowie verbleibende Herausforderungen der Nutzung dieser Anzeigetechnologie identifiziert.

## 1.2 Problemstellung und Forschungsfragen

Auch wenn der Einsatz von Datenbrillen im Fahrzeug wohl grundsätzlich sinnvoll ist, sind eine Reihe von Rahmenbedingungen zu beachten und entsprechende Konsequenzen für die Nutzung dieser neuen Technologie auszuarbeiten. Da in dieser Dissertation der Einsatz von Datenbrillen *während der Fahrt* untersucht wird, sind insbesondere die möglichen Folgen für die Durchführung der Fahraufgabe zu untersuchen. Grundsätzlich wird durch die sehr ähnliche Anzeigetechnik davon ausgegangen, dass sich die Nutzung der Datenbrille, analog zur Verwendung eines HUD, positiv auf das Blickverhalten des Fahrers auswirken kann. Allerdings erlaubt die Datenbrille eine erheblich größere Flexibilität bei der Entscheidung, *wie* letztlich die Inhalte angezeigt werden.

So können mit einer Datenbrille, wie mit einem HUD oder anderen fest im Fahrzeug verbauten Anzeigen, Inhalte stabil an einem bestimmten Ort angezeigt werden. Hierfür müssen die in der Datenbrille angezeigten Inhalte ständig und in Echtzeit mit der Kopfposition des Nutzers verrechnet und ihre Position im Blickfeld entsprechend verändert werden. Die Anzeigen können jedoch auch immer an der gleichen Position im Blickfeld des Fahrers dargestellt werden. Diese spezielle Art der kopfdrehungsunabhängigen Anzeige von Informationen ist mit einem HUD nicht möglich. Es ergibt sich die Fragestellung, wie diese neue Art der Informationsdarstellung optimal genutzt werden kann, welche Nachteile sich im Vergleich zu ortsfesten Anzeigen ergeben und wie diese gegebenenfalls umgangen werden können.

**FF1: Welche Auswirkungen hat die kopfdrehungsunabhängige Anzeige von Information im primären Blickfeld des Fahrers und worin liegen die Unterschiede zu ortsfesten Anzeigen?**

Theoretisch können durch den Einsatz von Datenbrillen im Fahrzeug neue Anwendungsfälle dargestellt und Probleme mit bereits bestehenden Anzeigetechnologien, wie dem HUD, überwunden werden. Durch den technologischen Fortschritt konnte die Qualität der Anzeigen in den letzten Jahren nochmals erheblich gesteigert werden. Doch im Fahrzeug bestehen extrem hohe Anforderungen an die Mensch-Maschine-Schnittstelle. Es muss überprüft werden, ob die Datenbrille diesen Anforderungen gerecht wird und auch im Fahrzeug eine sinnvolle Alternative zu etablierten Anzeigetechnologien darstellt. Verbleibende Herausforderungen werden in der Folge identifiziert und mögliche Lösungsansätze untersucht.

**FF2: Wo liegen die verbleibenden technologischen Herausforderungen beim Einsatz von Datenbrillen im Fahrzeug und wie können diese bewältigt werden?**

Bei der Frage wie letztlich Informationen möglichst ablenkungsarm in einer Datenbrille dargestellt werden sollten, müssen weitere Parameter für die Anzeige von Inhalten bestimmt werden. So beeinflusst beispielsweise die Anzahl, Größe und Art der Inhalte möglicherweise das Ausmaß der Ablenkung während der Fahrt. Hier werden eventuell vorhandene Obergrenzen identifiziert und erste Empfehlungen formuliert.

**FF3: Welche Anzeigeparameter sollten bezüglich Anzeigeort, -Größe und -Menge gewählt werden?**

Letztlich werden bei den meisten Anwendungen im Fahrzeug Inhalte nicht nur angezeigt. Der Fahrer soll Systeme parametrisieren, Eingaben tätigen und Informationen aktiv abrufen können. Hierbei stellt sich die Frage, wie die speziellen Eigenschaften einer Datenbrille so genutzt werden können, dass der Fahrer eines Fahrzeugs davon profitieren kann. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit mehrere neuartige und speziell auf die Eigenschaften der Datenbrille zugeschnittene Anzeige- und Bedienkonzepte entwickelt. Auch interaktive Inhalte können theoretisch sowohl fest im Fahrzeug verortet als auch kopfdrehungsunabhängig angezeigt werden. In dieser Arbeit wird daher auch der Frage nachgegangen, wie sich die Wahl des Referenzkoordinatensystems dabei auf die Fahr- und Nebenaufgabe auswirkt. Des Weiteren versprechen neue Bedienmodalitäten, wie der Einsatz von Gestik, einfachere, intuitivere und ablenkungsärmere Benutzungsschnittstellen im Fahrzeug. Diese werden für die Datenbrille den etablierten Eingabetechniken, wie der Benutzung von Bedienelementen in der Mittelkonsole oder am Lenkrad, gegenübergestellt und entsprechende Effekte auf Fahr- und Nebenaufgabe sowie mögliche Wechselwirkungen mit der Anzeigereferenz untersucht.



**FF4: Durch welche Anzeigekonzepte können die Vorteile einer Datenbrille effektiv für den Einsatz im Fahrzeug genutzt werden und welche Auswirkungen haben die Anzeigereferenz und die Eingabemodalität bei der Interaktion mit Sekundäraufgaben?**

## 1.3 Forschungsansatz

Neben der Recherche verwandter Forschungsliteratur werden zur Durchdringung des Themas zwei Herangehensweisen verwendet. Ein Teil der Problemstellung bezieht sich auf sehr grundlegende Fragen zur Anzeige von Information wie die Wahl unterschiedlicher Anzeigeparameter und deren Auswirkungen auf die Fahraufgabe. Diese Fragestellungen wurden mit Hilfe von grundlagenorientierten Probandenstudien in einer Fahrsimulation oder im Realfahrzeug untersucht.

Daneben werden in dieser Arbeit konkrete Konzeptvorschläge gemacht, wie durch die Wahl geeigneter Anzeige- und Interaktionskonzepte die Eigenschaften einer Datenbrille für die Verwendung im Fahrzeug optimal genutzt werden können. Anhand dieser Konzepte können mögliche Effekte der verwendeten Interaktionsmodalität und eventuelle Wechselwirkungen mit unterschiedlichen Anzeigeformen untersucht werden. Dabei werden die dafür notwendigen Entwurfsentscheidungen in mehreren, iterativen Konzeptions- und Evaluationszyklen getroffen. Hierbei steigt die Wiedergabetreue der verwendeten Prototypen kontinuierlich:

In ersten Brainstorming-Runden, Fokusgruppen und Expertenevaluationen kommen Papierprototypen und einfache Konzeptzeichnungen zur erfolgreichen Kommunikation erster Ideen zum Einsatz. Anschließend werden erste Konzeptbestandteile möglichst schnell funktional implementiert, um möglichst frühe Nutzerrückmeldungen zu erhalten und in die Konzeptentwicklung miteinzubeziehen. Abschließend führt dieses Vorgehen zu umfangreichen Probandenstudien in entsprechend gewählten Simulatorumgebungen. Hier werden unterschiedliche Konzeptvarianten untersucht und Vergleiche mit dem Stand der Technik durchgeführt.

## 1.4 Forschungsbeitrag

Durch die Entwicklung der interaktiven Prototypen und die Durchführung und Auswertung der entsprechenden Probandenstudien kann diese Arbeit einen Beitrag zum Forschungsfeld der Verwendung von Datenbrillen und HUDs im Fahrzeug leisten. Die folgenden Abschnitte fassen diesen Beitrag kurz zusammen, eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse befindet sich in Kapitel 6.1.

### 1.4.1 Eingrenzung eines Design Space für die Benutzung von Datenbrillen im Fahrzeug

Datenbrillen, so wird im Laufe dieser Arbeit deutlich, bieten eine Vielzahl an Möglichkeiten, sowohl bezüglich der Anzeige von Information, als auch im Hinblick auf die Interaktion mit dargestellten Inhalten. Dabei spielt bereits der technische Aufbau der verwendeten Datenbrille eine entscheidende Rolle. Ob das HMD über eines oder zwei Anzeigeeinheiten verfügt oder ob die Gläser der Datenbrille lichtdurchlässig sind oder ein Videobild für die Mischung realer und virtueller Inhalte genutzt wird, hat beispielsweise einen großen Einfluss auf die Eignung dieser Anzeigetechnologie für unterschiedliche Anwendungsgebiete.

Dabei kann der Design Space für die Verwendung einer Datenbrille im Fahrzeug bereits durch die Lektüre und Analyse verwandter Forschungsarbeiten, beispielsweise aus dem Bereich der Luftfahrt, eingeschränkt werden und eine erste Fokussierung der Arbeit erfolgen. Die Informationsdarstellung und Verwendung interaktiver Systeme im Fahrzeug unterliegt jedoch besonderen Einschränkungen. Weiterführende Untersuchungen werden daher anschließend durch entsprechende Studien durchgeführt. Letztlich werden erste Empfehlungen ausgesprochen und künftiger Untersuchungsbedarf formuliert.

### 1.4.2 Prototypische Entwicklung von Anwendungen für Datenbrillen im Fahrzeug

Bei der prototypischen Entwicklung von Anwendungen für die Datenbrille müssen, speziell wenn diese in einer Umgebung wie dem Fahrzeug eingesetzt werden sollen, besondere Herausforderungen berücksichtigt werden. Die spätere Mischung virtueller und realer Inhalte und die hohe Dynamik der Anzeigen durch eventuelle Abhängigkeiten von der Kopfrota-tion sind beispielsweise Eigenschaften, die sich in frühen Projektphasen mit herkömmlichen Papierprototypen nicht zufriedenstellend abbilden lassen. Aber auch bei der Entwicklung und Programmierung funktionaler Prototypen sind diese Eigenschaften nicht oder nur durch hohen technischen Aufwand und eine Verlagerung der Anwendungsentwicklung in ein Fahrzeug darstellbar.

In dieser Arbeit werden daher Werkzeuge vorgestellt, die sich sowohl für die frühe Konzeptphase (Papier-Prototyp) als auch für iterative Entwicklung funktionaler Prototypen eignen. So können die oben genannten Anforderungen in allen Phasen der Konzeptentwicklung berücksichtigt werden.

### 1.4.3 Informationsanzeige – Effekte und Potenziale

Bei der Anzeige von Information auf der Datenbrille gibt es grundsätzlich eine größere Variantenvielfalt als mit anderen Anzeigetechnologien. Dadurch, dass sie am Kopf des Benutzers getragen wird, ist die Darstellung von Inhalten unabhängig von der Kopfdrehung des Nutzers möglich. Andererseits können durch den zusätzlichen Einsatz eines Kopf-Trackers

auch stationäre Bildschirme, wie beispielsweise ein fest im Fahrzeug verbautes HUD, an einer beliebigen Position in der Umgebung des Fahrers simuliert werden. Diese Arbeit untersucht den Einfluss der Wahl dieses Referenzsystems (das der Brille selbst oder das des Fahrzeugs) auf die Wahrnehmung der angezeigten Information und stellt die Folgen für die erfolgreiche Durchführung der Fahraufgabe dar. Dabei werden mögliche Probleme sowie Potenziale der unterschiedlichen Anzeigarten identifiziert und aufgezeigt, wie mit technologischen Grenzen umgegangen werden kann. Weiterhin wird die optimale Anzeigeposition sowie die maximale Anzeigegröße und Menge der dargestellten Inhalte in drei aufeinanderfolgenden Studien systematisch untersucht.

#### 1.4.4 Interaktive Prototypen – Effekte von Bedienmodalität und Anzeigereferenz auf Interaktions- und Fahrverhalten

Für die Interaktion mit Informationen auf der Datenbrille stehen dem Fahrer eine Vielzahl von Bedienmodalitäten zur Verfügung. In dieser Arbeit wird gezeigt, wie diese sinnvoll eingesetzt werden können, um die Vorteile der neuen Anzeigetechnologie optimal nutzen zu können. Dabei wird die Anzeigereferenz, also die Unterscheidung zwischen kopfrotationsunabhängigen und ortsfesten Anzeigen, in zwei der Studien variiert, um mögliche Effekte auf die Fahr- und Sekundäraufgabe sowie Wechselwirkungen mit der Eingabemodalität zu untersuchen.

Ein wichtiger Forschungsbeitrag sind dabei die entwickelten Konzepte selbst. Hier werden neue Interaktionstechniken für den Einsatz im Fahrzeug entwickelt und deren Potenzial für die Bedienung einer Nebenaufgabe untersucht. Außerdem werden anhand der verwendeten Anwendungsfälle exemplarisch Techniken aufgezeigt, wie die indirekte Interaktion mit Inhalten in einer Datenbrille erleichtert und verbessert werden kann. So wird demonstriert, wie die Unterbrechbarkeit von Interaktionsabläufen auch bei der Informationsdarstellung im primären Sichtfeld gewährleistet werden kann. Weiterhin wird die Bedeutung haptischen Feedbacks für indirekte Interaktion mit einer Nebenaufgabe bestätigt und entsprechende Beispiele für deren Verwendung im Zusammenhang mit der Datenbrille gegeben. Die Verwendung neuer Eingabemodalitäten wie Blick- oder Handgesten werden im Zusammenhang der Datenbrille untersucht, sowie verbleibende Herausforderungen aufgezeigt.

#### 1.4.5 Empfehlungen für die Benutzung von Datenbrillen im Fahrzeug

Aus den Ergebnissen der Studien aus den beiden Bereichen, der *Anzeige von Information* und der *Interaktion mit Inhalten*, werden abschließend konkrete Empfehlungen für die Nutzung von Datenbrillen im Fahrzeug abgeleitet. Hierbei wird deutlich, dass selbst bei der relativ stark eingegrenzten Verwendung im Fahrzeug sämtliche Empfehlungen anwendungsbezogen stattfinden müssen. So kann bei der Anzeige kritischer Information (beispiels-

weise einer Warnung) die kopfrotationsunabhängige, fahrzeuginitiierte und zentrale Darstellung optimal sein, wohingegen für die Interaktion mit einer Infotainment-Anwendung vollkommen gegenteilige Empfehlungen gelten. Abschließend werden verbleibende Herausforderungen der neuen Technologie beleuchtet und Wege aufgezeigt, wie diese bewältigt werden können.

## 1.5 Struktur der Arbeit

In **Kapitel 2 – Hintergrund** werden wichtige Grundlagen zusammengefasst, die für das Verständnis der darauffolgenden Abschnitte notwendig sind. Beginnend mit den Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug (Abschnitt 2.1) werden zunächst die Begriffe der Haupt- und Nebenaufgaben im Fahrzeug definiert und das Thema Ablenkung aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet. Anhand der wichtigsten Erkenntnisse aus der HUD-Forschung (Abschnitt 2.2) wird die Motivation für das Thema dieser Arbeit vertieft und die Grundlagen für die halbtransparente Anzeige von Informationen über der Fahrscene gelegt. Weitere Grundlagen für Anzeige- und Interaktionskonzepte, speziell für den Einsatz auf einer Datenbrille, werden anhand relevanter Forschungsarbeiten aus dem Bereich der Head-Mounted Displays gelegt (Abschnitt 2.3). Über die Durchsicht anwendungsbezogener Arbeiten aus dem Bereich der Luftfahrt und sogar im Fahrzeug (Abschnitt 2.4) können abschließend erste Ansätze für den Forschungsbedarf in dieser Arbeit gewonnen werden (Abschnitt 2.5).

In **Kapitel 3 – Konzeption, Entwicklung und Evaluation der Konzepte** werden Herausforderungen bei der prototypischen Umsetzung von Konzepten für die Datenbrille identifiziert und resultierende Schwierigkeiten für die Kommunikation der Ideen während des Entwicklungsprozesses benannt. Anschließend werden zwei Techniken zur Prototypenentwicklung vorgestellt (Abschnitt 3.1 und 3.2), die sich im Rahmen dieser Arbeit bewährt haben. Abschließend werden die in dieser Arbeit verwendeten Evaluationsumgebungen vorgestellt (Abschnitt 3.3).

In **Kapitel 4 – Informationsanzeige** werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Grundlagenuntersuchungen (Abschnitt 4.1 – 4.3) sowie ein Anzeigekonzept (Abschnitt 4.4) beschrieben, die sich auf die Anzeige von Information in einer Datenbrille fokussieren. In jedem dieser Abschnitte wird zunächst der Untersuchungsgegenstand beschrieben und motiviert. Darauf folgt eine Beschreibung einer oder mehrerer aufeinanderfolgender Studien. Jeder Abschnitt schließt mit einer kurzen Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.

In **Kapitel 5 – Interaktionstechniken** werden Konzepte zur Interaktion mit Inhalten in der Datenbrille beschrieben. In den jeweiligen Probandenstudien werden dabei bestimmte Aspekte des Konzepts, wie etwa die Bedien- oder Anzeigemodalität, variiert, sowie gegebenenfalls Vergleiche mit dem Stand der Technik durchgeführt. In Abschnitt 5.4 wird außerdem ein Experiment zur Wahrnehmung der Umgebung während der Interaktion mit der Datenbrille im Vergleich zum HUD und Kombiinstrument durchgeführt. Analog zu Kapitel 4 beginnt jeder Abschnitt mit einer Konzeptmotivation und eventuell zusätzlich

benötigtem Hintergrundwissen aus verwandten wissenschaftlichen Arbeiten. Nach einer detaillierten Beschreibung des entsprechenden Konzepts folgt die Dokumentation der Probandenstudie. Abgeschlossen wird jedes Kapitel mit einer kurzen Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.

In **Kapitel 6 – Fazit und Ausblick** werden die in dieser Dissertation erarbeiteten Ergebnisse zusammenhängend diskutiert (Abschnitt 6.1). Aufbauend darauf werden dann entsprechende Schlussfolgerungen gezogen und erste Empfehlungen für die Verwendung der Datenbrille im Fahrzeug formuliert (Abschnitt 6.2). Abschließend werden einige offengebliebenen Fragen diskutiert und Empfehlungen für künftige Untersuchungen ausgesprochen (Abschnitt 6.3).



# Kapitel 2

---

## Hintergrund

### 2.1 Grundlagen der Mensch-Maschine Interaktion im Fahrzeug

Die Bedienung interaktiver Systeme im Fahrzeug ist besonderen Rahmenbedingungen unterworfen, da ein Fahrer dieser Tätigkeit nie seine volle Aufmerksamkeit widmen kann. Seine primäre und wichtigste Aufgabe ist stattdessen das Fahren. Sämtliche andere Tätigkeiten, denen ein Fahrer im Fahrzeug währenddessen nachgehen kann, lenken ihn potenziell davon ab. Dies führt dazu, dass bei der Entwicklung und Bewertung interaktiver Systeme im Fahrzeug stets sichergestellt werden muss, dass diese den Fahrer nicht oder nur in einem vertretbaren Maße davon abhalten die Fahraufgabe bestmöglich durchzuführen. In diesem Kapitel werden die notwendigen theoretischen Grundlagen für die Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug vorgestellt und etablierte Bewertungskriterien beschrieben.

#### 2.1.1 Aufgaben eines Fahrzeugführers

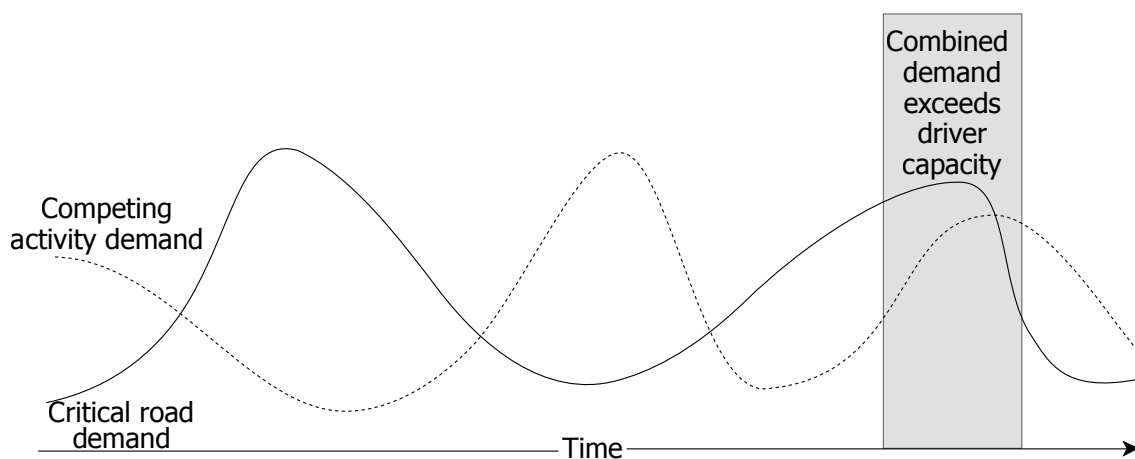
Es existieren verschiedene Ansätze die Aufgaben eines Fahrzeugführers zu klassifizieren. Geiser unterscheidet zwischen der Stabilisierung des Fahrzeugs, der Führungsaufgabe und der Navigationsaufgabe [46]. Die Stabilisierung des Fahrzeugs beinhaltet dabei einzig die Längs- und Querregelung des Fahrzeugs auf der Fahrbahn, also die Kontrolle von Längsbeschleunigung und der Position des Fahrzeugs auf der Spur. Die Führungsaufgabe bezeichnet die Wahl des Geschwindigkeitsniveaus und des Weges auf der Fahrbahn, also beispielsweise die Entscheidung über einen Überholvorgang oder einen Spurwechsel. Die Navigationsaufgabe beschreibt schließlich die Wahl des Weges vom Start zum Ziel.

Tönnis et al. unterscheiden im Gegensatz dazu zwischen primären, sekundären und tertiären Aufgaben im Fahrzeug [162]. Die Primäraufgaben bestehen demnach aus allen Aufgaben, die für die Steuerung des Fahrzeugs selbst notwendig sind, also der Kontrolle über

die Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs sowie über die Distanz zu anderen Fahrzeugen und Objekten. Unter den Sekundäraufgaben werden alle Aufgaben zusammengefasst, die im direkten Zusammenhang mit der Durchführung der Primäraufgabe stehen und deren Durchführung somit unumgänglich ist. Dazu gehören beispielsweise das Setzen des Blinkers oder die Bedienung des Scheibenwischers. Alle übrigen Aufgaben, die nicht in direktem Zusammenhang mit der Fahraufgabe stehen, zählen Tönnis et al. zu den Tertiäraufgaben.

Die allgemeinste Unterscheidung stammt von der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) und differenziert lediglich zwischen der Primäraufgabe und Sekundäraufgaben [113]. Unter der Primäraufgabe werden dabei alle Tätigkeiten zusammengefasst, die zum Fahren zwingend notwendig sind, während alle übrigen Tätigkeiten als Sekundäraufgaben bezeichnet werden. Wird in den späteren Kapiteln dieser Arbeit von Primär- oder Sekundäraufgabe gesprochen, so bezieht sich diese Begrifflichkeit auf die Definition der NHTSA.

Bei der Durchführung der Primäraufgabe, also dem Fahren selbst, ist der Fahrer ständig potenziellen Ablenkungsquellen ausgesetzt. Zu diesen Ablenkungsquellen gehört jedoch nicht ausschließlich die Beschäftigung mit Sekundäraufgaben. Ablenkung im Fahrzeug, so beispielsweise eine Definition von Young et al., tritt immer dann auf, wenn die Aufmerksamkeit des Fahrers unbeabsichtigt oder beabsichtigt durch ein Ereignis oder ein Objekt so eingenommen wird, dass der Fahrer nicht länger dazu in der Lage ist die Fahraufgabe sicher durchzuführen [182].

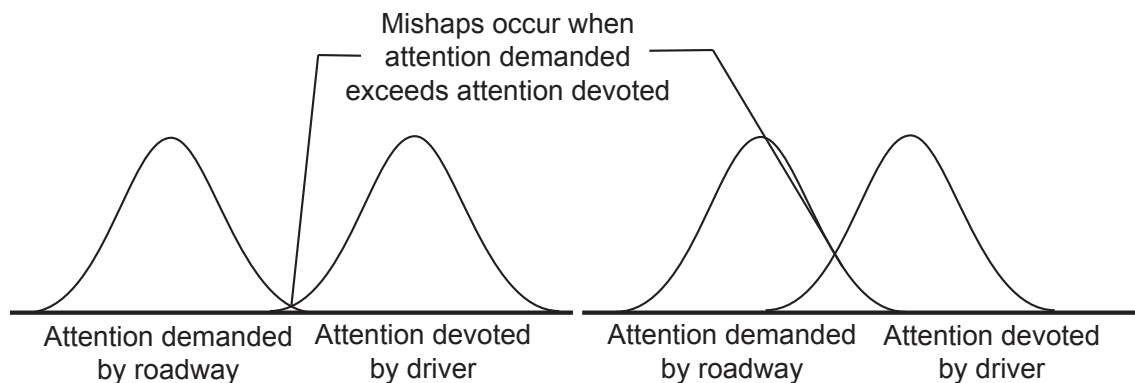


**Abbildung 2.1:** Die Anforderungen (demands), die von der Verkehrssituation (durchgezogene Linie) und einer zusätzlichen Aktivität (gestrichelte Linie) an den Fahrer gestellt werden. Wenn beide Anforderungen kombiniert, die Kapazitäten des Fahrers überschreiten, kann das zu ablenkungsspezifischen Unfällen führen. Abbildung aus [91].

Abbildung 2.1 zeigt schematisch, wie eine solche Situation durch die Beschäftigung mit einer Sekundäraufgabe während der Fahrt zustande kommen kann. Beide Aufgaben, die Sekundäraufgabe und die Fahraufgabe, belegen dabei situationsabhängig ein unterschiedliches hohes Maß an sensorischen oder mentalen Kapazitäten des Fahrers. Das Unfallrisiko



ist dabei besonders hoch, wenn die kombinierten Anforderungen von Fahraufgabe und einer fahrfremden Aufgabe in einem Moment ein bestimmtes, vertretbares Maß überschreiten [91]. Abbildung 2.2 zeigt schematisch, wie verschiedene Verkehrssituationen dem Fahrer ein unterschiedlich großes Maß an Aufmerksamkeit abverlangen. Dabei ist die Häufigkeit, bei der dieses Maß an abverlangter Aufmerksamkeit das Maß an tatsächlich aufgewendeter Aufmerksamkeit überschreitet, wesentlich größer, wenn der Fahrer abgelenkt wird [91].



**Abbildung 2.2:** Die Häufigkeit (y-Achse) von Situationen in denen ein unterschiedlich hohes Maß an Aufmerksamkeit (x-Achse, von links nach rechts steigend) vom Fahrer verlangt (linke Kurve) und aufgebracht (rechte Kurve) wird. Bei einem aufmerksamen Fahrer (links) gibt es nur sehr wenige Situationen, in denen die aufgebrachte Aufmerksamkeit die geforderte unterschreitet. Bei einem abgelenkten Fahrer (rechts) hingegen, ist die Überlappung der beiden Kurven größer, das heißt die Anzahl der Situationen, in denen die aufgebrachte Aufmerksamkeit geringer ist, als es die Verkehrssituation erfordert, ist höher. Hier kann es leichter zu Unfällen kommen. Abbildung aus [91].

In der Forschung wird typischerweise zwischen vier Komponenten der Ablenkung unterschieden: Neben kognitiver Ablenkung kann außerdem visuelle, auditive oder biomechanische (physische) Ablenkung auftreten [182]. Neben dieser eher sensorisch orientierten Definition existieren noch weitere, eher tätigkeitsorientierte Ansätze Ablenkung im Fahrzeug zu klassifizieren. Bayly et al. unterscheiden beispielsweise zwischen technologiebasierter und nicht-technologiebasierter Ablenkung [14]. Dabei stellen sie fest, dass der Großteil der Ablenkungen nicht-technologiebasiert ist: Beispiele hierfür sind Essen und Trinken, Rauchen, nach Objekten greifen oder die Interaktion mit Passagieren. Die Forschung beschäftigt sich dagegen hauptsächlich mit den eher technologiebasierten Ablenkungsquellen. Weiterhin stellen sie fest, dass die potenziellen Quellen für Ablenkung sich nicht zwangsweise negativ auswirken müssen. Neben dem offensichtlichen Beispiel, dass ein gut entworfenes integriertes Navigationssystem weniger ablenkend sei als eine Karte aus Papier, könne auch eine Unterhaltung mit einem Mitfahrer die Aufmerksamkeit hochhalten, da sie Langeweile verhindere.

Um die durch die Systeme im Fahrzeug hervorgerufene Ablenkung zu reduzieren, gibt es zahlreiche Empfehlungen und Richtlinien. In der Industrienorm ISO 15005 wird beispielsweise festgehalten, dass die Bedienung von Systemen im Fahrzeug so gestaltet werden muss, dass stets mindestens eine Hand des Fahrers am Lenkrad bleibt und die durchgeführten Aufgaben unterbrechbar sind [116]. Über das Prinzip der Unterbrechbarkeit wird

gefordert, dass der Fahrer zu jedem Zeitpunkt in der Lage sein muss einen begonnenen Dialog mit dem System zu beenden und diesen später an einem vordefinierten Zustand wiederaufzunehmen. Auch die Alliance of Automobile Manufacturers (AAM) rät zur Vermeidung nicht-unterbrechbarer Dialogsequenzen [52]. Außerdem fordert sie, dass es für jede unterbrochene Dialogsequenz einen logisch nachvollziehbaren Punkt (bestenfalls der Punkt der Unterbrechung) gibt, an dem die Arbeit wieder aufgenommen werden kann [52]. So soll eine maximale Bereitschaft der Fahrer zur Unterbrechung einer Sekundäraufgabe im Falle einer fordernden Verkehrssituation erreicht werden [52].

Die Entwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstellen für die Durchführung fahrfremder Sekundäraufgaben ist jedoch nicht nur unter dem Aspekt des gleichzeitigen Fahrens herausfordernd. Die Weiterentwicklung immer leistungsfähiger Fahrassistenzsysteme befähigt das Fahrzeug einen Großteil der Fahraufgabe weitgehend eigenständig vorzunehmen. Aktuell wird zwischen fünf Stufen der Automatisierung der Fahraufgabe unterschieden [164]:

- Stufe 0 bezeichnet die komplett manuelle Fahrt
- In der Stufe 1 wird entweder die Quer- oder Längsführung des Fahrzeugs bereits automatisch vorgenommen
- In Stufe 2 wird sowohl die Quer- als auch die Längsführung des Fahrzeugs automatisch vorgenommen. Die Aufgabe des Fahrers besteht darin, auf die korrekte Durchführung der Fahraufgabe zu achten und das System zu überwachen.
- In Stufe 3 werden bereits alle fahrrelevanten Funktionen des Fahrzeugs automatisch vorgenommen. Es kann allerdings zu Situationen kommen, in denen der Fahrer eingreifen muss.
- In Stufe 4 kann das Fahrzeug die Fahraufgabe vollkommen autonom übernehmen und alle Situationen können vom System, ohne Eingriff des Menschen, selbständig bewältigt werden.

Rauch et al. stellen fest, dass zu erwarten ist, dass Fahrer in den dadurch veränderten Fahrsituationen vermehrt zu Nebenbeschäftigungen wie der Bedienung von Infotainment-Systemen greifen werden [128]. Besonders interessant für die Nutzung einer Datenbrille sind in diesem Zusammenhang die Automatisierungsstufen 2 und 3. Da der Fahrer hier prinzipiell noch einen kleinen Teil der Fahraufgabe übernehmen muss (Überwachung oder Systemeingriffe), müssen Möglichkeiten zur Aufmerksamkeitslenkung und -teilung bereitgestellt werden. Der Einsatz halbtransparenter oder kopfdrehungsunabhängiger Anzeigen kann möglicherweise zum sicheren Gebrauch dieser Systeme beitragen.

In dieser Arbeit wird hauptsächlich das manuelle Fahren betrachtet (Stufe 0), ein Konzept wurde jedoch speziell für das Fahren in der Automatisierungsstufe 2 entwickelt.

### 2.1.2 Grundlagen des menschlichen Sehens

Neben der kognitiven Komponente von Ablenkung, die je nach Komplexität der Sekundäraufgabe immer einen entsprechenden Einfluss besitzt, wird für die Benutzung der Datenbrille im Fahrzeug besonders die visuelle Komponente der Ablenkung als besonders wichtig erachtet. Der Fahrer wird durch die Verarbeitung visueller Reize ohnehin bereits erheblich beansprucht und die Projektion virtueller Inhalte in sein primäres Sichtfeld sorgt dabei vermutlich für zusätzliche Komplexität. In diesem Abschnitt werden einige Grundlagen des menschlichen Sehens zusammengefasst, um das Verständnis der nachfolgenden Kapitel zu erleichtern.

Die Auflösung des menschlichen Sehens beträgt etwa eine Winkelminute [72]. Das Sichtfeld eines Menschen beträgt für jedes Auge etwa  $90^\circ$  nach außen (temporal),  $50^\circ$  nach oben (superior),  $50^\circ$  nach innen (nasal) und  $60^\circ$  nach unten (inferior) [153]. Durch die Kombination des Sichtfelds beider Augen entsteht dadurch ein horizontales Blickfeld von etwa  $195^\circ$  [72]. Dabei wird jedoch lediglich ein kleiner Teil der wahrgenommenen Szene fokussiert, also „scharf“ wahrgenommen. Dieser Bereich wird für das foveale Sehen genutzt und deckt einen Sichtkegel von etwa  $2^\circ$  des Blickfelds ab [129]. Der angrenzende Bereich, in dem das Sehvermögen bereits stark nachlässt, wird für das sogenannte parafoveale Sehen genutzt und nimmt einen Sichtkegel von etwa  $10^\circ$  ein [129]. Der übrige Sichtbereich ist für das periphere Sehen zuständig [129]. Da nur im Bereich des fovealen Sehens das volle Sehvermögen erreicht wird, bewegt der Mensch seine Augen ständig zu dem Punkt, an dem der gewünschte Szenenausschnitt mit maximaler Genauigkeit betrachtet werden kann [129]. Diese schnellen Augenbewegungen, die eine Geschwindigkeit von bis zu  $500^\circ$  pro Sekunde erreichen können, werden Sakkaden genannt [102]. Da während der Sakkaden keine Information aufgenommen werden kann, wechseln sie sich bei visueller Informationsaufnahme mit Fixationsphasen, also Phasen in denen das Auge für eine Dauer von etwa 200 bis 300 ms still steht, ständig ab [129]. Außer den Sakkaden gibt es weitere Augenbewegungen. Diese treten auf, wenn die Augen einem Objekt folgen (*pursuit*), wenn sich die Augen leicht nach innen bewegen, um ein Objekt fixieren zu können (*vergence*) und wenn Kopfbewegungen durch gegensätzliche Augenbewegungen ausgeglichen werden (*vestibular*) [129]. Die vestibularen Augenbewegungen nehmen beim Autofahren eine besondere Rolle ein, da die durch das sich bewegende Fahrzeug entstehenden Vibrationen ständig durch die Augen ausgeglichen werden müssen [95]. Diese Ausgleichsbewegungen können für die in einer Datenbrille dargestellten Inhalte zwar noch durchgeführt werden. Da sich das dargestellte Bild im Unterschied zu allen übrigen Objekten jedoch exakt so bewegt wie der Kopf des Fahrers, verschieben sich die virtuellen Inhalte ständig gegenüber der Realität.

Ein weiteres Phänomen, das für die Benutzung der Datenbrille von Interesse ist, ist die sogenannte *change blindness* beziehungsweise die damit verwandte *inattentional blindness*. Beide Phänomene beschreiben den Effekt, dass eine Szene ständig betrachtet wird, Änderungen in dieser jedoch trotzdem unbemerkt bleiben. Dabei ist *change blindness* eher gedächtnisorientiert und tritt durch eine kurze Wahrnehmungsunterbrechung, beispielsweise durch ein Zwinkern, auf [134, 175]. Im Gegensatz dazu liegt bei dem Phänomen der *inattentional blindness* der Grund für die fehlende Wahrnehmung der Veränderung darin,

dass die Aufmerksamkeit des Betrachters nicht auf dem Objekt liegt, in dessen Kontext die Veränderung vollzogen wird [175].

### 2.1.3 Informationsanzeige und Auswirkungen auf den Fahrer

Ein Versuch die unterschiedlichen interaktiven Systeme, mit denen der Fahrer während der Fahrt potenziell interagiert, zu klassifizieren, liegt in der Unterscheidung zwischen Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) und In Vehicle Information Systems (IVIS) (siehe beispielsweise [69, 91]). Zur Gruppe der ADAS gehören dabei alle Systeme, die den Fahrer durch eine Assistenzfunktion bei der Durchführung der Fahraufgabe unterstützen. Hierzu gehört beispielsweise ein Bremsassistent, der den Fahrer vor Kollisionen schützen soll. Dabei wird der Fahrer bei einer drohenden Kollision zunächst mehrstufig und mit steigender Dringlichkeit gewarnt sowie letztlich durch eine Bremskraftverstärkung oder einen automatischen Bremsvorgang unterstützt. Einmal aktiviert, muss dieses System nicht mehr bedient werden: Sowohl die Warnung als auch die aktive Unterstützung geschehen automatisch und ohne Zutun des Fahrers. Doch auch die Assistenzsysteme, die die Längs- und/oder Querverführung des Fahrzeugs selbständig übernehmen (wie beispielsweise das Assistenzsystem Active Cruise Control (ACC)), gehören zu dieser Kategorie. Im Falle des Einsatzes von ACC gibt der Fahrer eine Richtgeschwindigkeit vor, das Fahrzeug versucht diese möglichst konstant zu halten, hält jedoch gleichzeitig einen vorher festgelegten Abstand zu einem eventuell vorhandenen vorausfahrenden Fahrzeug. Folglich werden Eingaben des Fahrers erforderlich, beispielsweise die Parametrisierung des Abstands zum Vorderfahrzeug, das Anpassen der Richtgeschwindigkeit oder die erneute Aktivierung nach einem manuellen Eingriff durch den Fahrer.

Zur Gruppe der IVIS gehören alle Systeme, die den Fahrer informieren und unterhalten; sie werden in dieser Arbeit auch kurz als *Infotainment-Systeme* bezeichnet. Beispiele für diese Art von Systemen sind ein Navigationssystem, Telefonie, Internet-basierende Dienste oder das Abrufen fahrzeugbezogener Informationen wie des Reifendrucks.

Zu Darstellung der benötigten Information werden unterschiedliche Anzeigorte im Fahrzeug so miteinander kombiniert, dass eine optimale Aufteilung der anzuzeigenden Information ermöglicht wird [37]. Informationen aus der Gruppe der IVIS werden klassischerweise nicht im direkten Blickfeld des Fahrers angezeigt sondern, sofern vorhanden, auf einem Bildschirm in der Mittelkonsole (siehe Abbildung 2.3).

Die genaue Position und Größe dieses Bildschirms (in dieser Arbeit auch Central Information Display (CID) genannt) ist von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich. Oft wird aus ergonomischen Gründen jedoch der obere Bereich der Mittelkonsole hierfür verwendet und der Bildschirm leicht zum Fahrer geneigt.

Informationen, die der Fahrer oft während der Fahrt benötigt und die einen direkten Bezug zur Fahraufgabe haben, werden meist im Kombiinstrument angezeigt. In der Vergangenheit

---

<sup>3</sup> Bildquelle: [www.car-ux.com/Audi](http://www.car-ux.com/Audi), ©Audi AG

<sup>4</sup> Bildquelle: [www.car-ux.com/Porsche](http://www.car-ux.com/Porsche), ©Porsche AG

<sup>5</sup> Bildquelle: [www.car-ux.com/BMW](http://www.car-ux.com/BMW), ©BMW AG



**Abbildung 2.3:** Bildschirm in der Mittelkonsole zur Anzeige von IVIS. Von links nach rechts im Audi A6<sup>1</sup>, Porsche 911 Targa<sup>2</sup> und BMW i3<sup>3</sup>. Bilder zugeschnitten.

beinhaltete das Kombiinstrument meist lediglich zwei Tuben zur analogen Darstellung der aktuellen Geschwindigkeit und Drehzahl, sowie einige Statusanzeigen (wie zum Beispiel Tankfüllung, Kilometerstand, Warnleuchten). Heute werden die analogen Tuben oft mit einem großen Bildschirm kombiniert oder sogar komplett auf diese verzichtet und zu einer rein digitalen Informationsdarstellung übergegangen (siehe Abbildung 2.4). Hierdurch wird die Informationsdarstellung auf dem Kombiinstrument erheblich flexibler und neue Informationen, wie etwa Kartenansichten, können integriert werden.



**Abbildung 2.4:** Kombiinstrument von links nach rechts im Volvo XC90<sup>4</sup>, Tesla Model S<sup>5</sup> und VW Passat (2015)<sup>6</sup>. Bilder zugeschnitten.

Ein dritter Anzeigeort, der ursprünglich aus der Luftfahrt kommt, jedoch auch im Fahrzeug immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist das Head-Up Display. Das HUD ist eine halbtransparente Anzeige im Blickfeld des Fahrers, welche in etwa drei Metern Entfernung knapp oberhalb der Motorhaube des eigenen Fahrzeugs erscheint. Ermöglicht wird diese Anzeige durch eine Spiegelung in der Windschutzscheibe: ein TFT-Display wird von Hochleistungs-Leuchtdioden bestrahlt und das dadurch entstandene Bild über eine Konstruktion aus teilweise asphärischen Spiegeln und Linsen auf einen speziell beschichteten Teil der Windschutzscheibe gelenkt [110]. Die Spiegel, beziehungsweise deren asphärische Konstruktion, haben dabei zum einen die Aufgabe den zurückgelegten Weg des Lichts so zu verlängern, dass die gewünschte Projektionstiefe erreicht wird [110]. Zum anderen verzerren sie das Bild so vor, dass es nach der Reflexion auf der unebenen Windschutzscheibe unverzerrt beim Betrachter erscheint [110]. Auch wenn Art und Umfang der im HUD dargestellten Informationen herstellerabhängig im Detail etwas variieren können, werden hier grundsätzlich die Informationen angezeigt, die während der Fahrt besonders oft benötigt werden. Bei den Herstellern BMW und Daimler können dies beispielsweise (abhängig

<sup>6</sup> Bildquelle: [www.car-ux.com/etc](http://www.car-ux.com/etc), ©Volvo AG

<sup>7</sup> Bildquelle: [www.car-ux.com/Tesla](http://www.car-ux.com/Tesla), ©Tesla Motors

<sup>8</sup> Bildquelle: [www.car-ux.com/VW](http://www.car-ux.com/VW), ©VW AG

von der Ausstattung des Fahrzeugs) die aktuelle Geschwindigkeit, temporäre Geschwindigkeitsbeschränkungen beziehungsweise Überholverbote sowie Navigationshinweise sein [19, 29]. Aber auch Assistenzfunktionen wie ACC, Auffahrwarnungen oder eine Nachsichtfunktion werden hier dargestellt [19, 29].

### 2.1.4 Interaktion mit Nebenaufgaben und Auswirkungen auf die Fahraufgabe

Für die möglichst ablenkungsarme Interaktion mit den dargestellten Inhalten bieten die Fahrzeughersteller verschiedene Eingabemodalitäten an. Bei den meisten Herstellern von Oberklassefahrzeugen setzte sich hierbei zunächst ein Dreh-Drücksteller (auch als Zentrales Bedienelement (ZBE) bezeichnet) als de-facto Standard durch. Der meist im unteren Bereich der Mittelkonsole angebrachte, runde Knopf erwies sich als besonders effektiv, um die auf hierarchischen Listen basierenden Funktionen im Fahrzeug zu bedienen und wird von BMW, Daimler, Audi und vielen weiteren Fahrzeugherstellern bis heute eingesetzt. Dabei wird durch Drehen des Knopfes von einem Menüelement zum nächsten gesprungen und durch Drücken des Knopfes das gerade aktive Menüelement ausgewählt. Weitere Funktionen, wie zum Beispiel ein Wechsel in die übergeordnete Hierarchiestufe des Menüs, können durch Kippen des Knopfes bedient werden (horizontal oder vertikal in beide Richtungen).

Doch nicht nur in der Mittelkonsole, sondern auch am Lenkrad haben sich physikalische Bedienelemente mittlerweile etabliert. Die entsprechende Bedieneinheit wird in dieser Arbeit häufig auch als Multifunktionslenkrad (MFL) bezeichnet. Neben Tasten und Wippen, kommen hier besonders kleine, meist vertikal orientierte, dreh- und drückbare Rädchen zum Einsatz (auch *Knurl* genannt). Sie erlauben es, die Funktionalität eines Dreh-Drückstellers so nachzubilden, dass die entsprechenden Funktionen auch mit einem einzigen Daumen am Lenkrad bedient werden können. In einer Studie konnten bei einem Vergleich zwischen Dreh-Drücksteller und MFL keine Auswirkungen auf die Fahraufgabe festgestellt werden; die Nebenaufgabe konnte jedoch unabhängig vom Anzeigeort schneller mit dem Dreh-Drücksteller bedient werden [37].

Angestoßen von den Entwicklungen in der Unterhaltungsindustrie werden außerdem immer mehr Touchscreens in aktuellen Fahrzeugen verbaut. Im Unterschied zu indirekten Interaktionsmodalitäten, bei denen eine Abbildung zwischen der durchgeführten Bewegung (beispielsweise Drehung) auf eine entsprechende Aktion des bedienten Elements (vertikales Verschieben eines Auswahlbereichs in einer Liste) notwendig ist, erlauben Touchscreens eine direkte Bedienung der Inhalte [31]. Während die meisten Hersteller jedoch noch auf eine Kombination aus Touch-Interaktion und der Bedienung mittels Knöpfe und Schalter setzen, ersetzt beispielsweise der Hersteller Tesla alle Bedieneinheiten in der Mittelkonsole durch einen einzigen, großen Touchscreen.

Es ist nicht abschließend geklärt, ob sich bei der Nutzung eines Touchscreens für die Interaktion im Fahrzeug Vorteile gegenüber dem Dreh-Drücksteller ergeben. In entsprechende Studien wurde festgestellt, dass die Sekundäraufgabe oft schneller auf einem Touchscreen bearbeitet werden kann als mit Hilfe eines Dreh-Drückstellers [57, 138]. Allerdings kann

sich die Verwendung von Touchscreens auch negativ auf das Blickverhalten des Fahrers auswirken [57]. Die langen Blickzeiten, die häufig auf die fehlende haptische Rückmeldung eines physikalischen Bedienteils zurückgeführt werden, werden als einer der Haupt-Nachteile von Touch-Screens gesehen [156]. Dabei ist gerade das Blickverhalten bei der Interaktion mit Nebenaufgaben im Fahrzeug von großer Bedeutung. Die AAM empfiehlt für die Interaktion mit Sekundäraufgaben während der Fahrt, dass die Dauer einer einzigen Blickabwendung 2 Sekunden nicht übersteigen und die Summe aller Blickabwendungen für eine komplette Aufgabe bei maximal 20 Sekunden liegen sollte [52]. Die NHTSA legt für die kumulierten Blickabwendungen, die zur Bearbeitung einer kompletten Aufgabe maximal benötigt werden dürfen, sogar eine Grenze von 12 Sekunden fest [113]. Aus diesem Grund wird untersucht, wie dieses Blickverhalten bei der Bedienung von Touchscreens verbessert, also die Anzahl und Dauer der notwendigen Blicke reduziert werden kann. Die Integration von haptischer Rückmeldung ist hierbei ein wichtiger Faktor. Beispielsweise kann durch die Verwendung eines zusätzlich in den Touchscreen integrierten Drehdruckstellers [142] oder die Nutzung haptisch erfühlbarer Strukturen [141] eine Blindbedienung ermöglicht werden. Auch die Verwendung eines aktuierten Touchscreens [135] kann sich durch die Möglichkeit der Rückmeldung über einen Bedienvorgang positiv bemerkbar machen. Eine rein konzeptioneller Ansatz die Blickabwendungen bei der Bedienung von Touchscreens zu reduzieren, besteht in der Verwendung relativer statt absoluter Touch-Gesten. Dabei wird ein sogenanntes Tortenmenü immer an der Position angezeigt, an der der Nutzer den Bildschirm berührt. Ein Menüelement wird dann durch die relative Bewegung in eine bestimmte Richtung ausgehend von dieser initialen Berührung ausgewählt [38]. Der Vorteil gegenüber statischen Listen besteht also darin, dass nicht mehr exakt ein bestimmter Bereich auf dem Bildschirm getroffen werden muss. Stattdessen muss der Nutzer lediglich wissen in welcher Richtung das gewünschte Element zu finden ist.

Eine vielversprechende Eingabemodalität, die ebenfalls bereits in Serienfahrzeugen eingesetzt wird, ist Sprache. Bei der Benutzung dieser Systeme müssen weder die Augen von der Straße abgewendet werden, noch ist es erforderlich, dass die Hände das Lenkrad verlassen. Doch obwohl bei deren Benutzung sowohl die visuelle als auch die motorische Komponente der Ablenkung entfallen, besitzt auch die Sprachinteraktion ein erhebliches Ablenkungspotenzial [90].

Auch die Interaktion mittels Handgesten wird bereits (wenn auch in sehr begrenztem Umfang und lediglich komplementär zu anderen Eingabemodalitäten) in Serienfahrzeugen eingesetzt, und ihre Verwendung in der Forschung intensiv diskutiert. Aufgrund des Potenzials die visuelle und kognitive Ablenkung im Vergleich zu traditionellen Eingabemodalitäten zu verringern [4], werden sowohl kontaktbasierende Gesten (beispielsweise am Lenkrad [32] oder in der Mittelkonsole [68]) als auch Handgesten im freien Raum (zum Beispiel [126, 136]) untersucht.

### 2.1.5 Messmethoden

Nachdem beschrieben wurde, was Ablenkung im Fahrzeug ist und wie sie entsteht, wird dieses Kapitel über die Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug nun mit

einem Abschnitt über Mess- und Bewertungskriterien für interaktive Systeme im Fahrzeug abgeschlossen.

### *Blickdaten*

Eines der wichtigsten Instrumente zur Messung visueller Ablenkung ist dabei die Erfassung der Blickdaten des Fahrers und deren Auswertung nach den Kriterien Dauer und Anzahl der Blickabwendungen von der Straße [113]. Dabei erfasst ein Kamerasystem die Kopf- und Pupillenposition des Fahrers. Aus diesen Daten kann dann die Blickrichtung des Fahrers ermittelt werden und so beispielsweise das Objekt bestimmt werden, auf das der Blick des Fahrers zu einem bestimmten Zeitpunkt gerichtet war.

Bedauerlicherweise ist die Erfassung der Blickdaten des Fahrers bei dem gleichzeitigen Tragen einer Datenbrille nicht mit den gleichen Mitteln wie bei dem Einsatz traditioneller Anzeigemedien möglich. Um das Blickverhalten beim Tragen einer Datenbrille nachvollziehen zu können, müssten beide Augen des Fahrers durch eine geeignete Kamera während der Fahrt beobachtet werden (beispielsweise eine Schwanenhals-Kamera). Zudem müsste der Kalibrier-Vorgang, durch den die Position der Datenbrille in Relation zu den Augen des Betrachters bestimmt wird, äußerst exakt sein, da eine minimale Abweichung der Trageposition, um einige Millimeter sich bereits signifikant auf die Bestimmung des Fixationspunkts auswirkt. Ist diese Position einmal eingemessen, dürfte sich diese während der gesamten Versuchsdurchführung (bzw. Fahrt) auch nicht mehr ändern. Problematisch ist außerdem, dass die Distanz zwischen Proband und Fahrszene in gängigen Simulationsumgebungen ähnlich groß ist wie die Darstellungstiefe der Inhalte in der Datenbrille. Dadurch entfällt die Bestimmung der Vergenz der Augen als zusätzliches Hilfsmittel zur Unterscheidung zwischen einer Fixierung auf die Fahrszene und einem Blick auf die Anzeigen in der Datenbrille.

Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit auf eine Analyse des Blickverhaltens verzichtet. Es existieren jedoch weitere, ebenfalls standardisierte Messmethoden, um die Eignung einer Sekundäraufgabe für die Durchführung während der Fahrt feststellen oder ablehnen zu können.

### *Fahrdaten*

**Folgefahrt als standardisierte Fahrsituation** Bei der Evaluation von interaktiven Systemen im Fahrsimulator wird neben vollkommen freien Fahrszenarien sehr häufig eine sogenannte Folgefahrt als Primäraufgabe verwendet. Die Verwendung einer solchen Folgefahrt wird auch von der NHTSA für die Evaluation von Sekundäraufgaben empfohlen, da so eine gewisse Vergleichbarkeit zwischen unabhängig voneinander durchgeführten Studien gewährleistet wird [113]. Anhand dieser Empfehlungen wurde auch ein Großteil der Primäraufgaben bei den in dieser Arbeit durchgeführten Experimenten entwickelt. Die einzelnen Parameter wurden jedoch teilweise verändert, einerseits, um die Fahrt auf die Gewohnheiten deutscher Autofahrer anzupassen, teilweise jedoch auch, um den Anforderungen eines speziellen Versuchsdesigns gerecht zu werden. Da in dieser Arbeit jedoch stets lediglich ein Vergleich zwischen Systemen innerhalb einer Studie stattfindet, haben diese Veränderungen keinen negativen Einfluss auf deren Aussagekraft.



Den Empfehlungen der NHTSA folgend findet eine Folgefahrt auf einer möglichst geraden, einer amerikanischen Schnellstraße nachempfundenen, Strecke statt. Die Aufgabe der Probanden ist es dabei einem vorausfahrenden Fahrzeug mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit von 50 mph (Meilen pro Stunde) und einem möglichst konstanten Abstand von 70 Metern zu folgen [113]. Statt einer amerikanischen Schnellstraße wurde in dieser Arbeit eine deutsche Autobahn verwendet, die Geschwindigkeit und der Abstand zum Vorderfahrzeug wurden entsprechend angepasst.

Im Folgenden werden die Bewertungskriterien für die in dieser Arbeit evaluierten Systeme vorgestellt. Bei der Bewertung der Durchführung der Primäraufgabe wird dabei zwischen Quer- und Längsführung unterschieden. Beide vorgestellten Messgrößen können dabei als ein indirektes Maß für die kognitive Last des Fahrers gewertet werden [49].

**Qualität der Querführung** Die Qualität der Querführung trifft eine Aussage darüber, wie gut es einem Probanden gelingt das Fahrzeug möglichst gleichmäßig auf der Spur zu halten, beziehungsweise möglichst wenig unbeabsichtigte oder als Korrekturmaßnahme durchgeführte Lenkbewegungen durchzuführen. Von der AAM wird dabei empfohlen die Anzahl der Überschreitungen der Spurbegrenzung zu zählen [52]. Durch die sehr geringe Komplexität der Fahraufgabe treten normalerweise nur sehr geringe Überschreitungen der Spurbegrenzung auf, was diesen Messwert eher ungeeignet macht, um feinere Unterschiede zwischen zwei Systemen zu identifizieren. Ein weiteres Instrument, das auch verwendet wird, um den Einfluss von Medikamenten [166] oder Alkohol [22] auf die Fahrleistung zu messen, ist die Standardabweichung der lateralen Position (Standard Deviation of Lateral Position (SDLP)). Auch wenn es Arbeiten gibt, die daran zweifeln lassen ob die SDLP in jedem Falle mit der kognitiven Last des Fahrers korreliert (z.B. [40, 50]), ist sie immer noch eine etablierte, qualitative Messmethode der durch den Sekundärtask erzeugten zusätzlichen Last (Task Load) [183] und findet nach wie vor breite Verwendung. Insbesondere zur Feststellung der zusätzlichen visuellen Beanspruchung des Fahrers, wird die SDLP als ein geeignetes Mittel angesehen [183]. Letztlich würde eine hohe SDLP im Extremfall ohnehin zu einer Überschreitung der Spurmarkierung führen [166], gibt jedoch bereits davor Aufschluss über die Qualität der Querführung und ist daher ein wesentlich sensibleres Messinstrument.

Die SDLP berechnet sich wie folgt [166]: Sei  $X$  die laterale Position des Fahrzeugs in der Spur (für jeden gültigen Datenpunkt bestimmt) mit einer mittleren lateralen Position in der Spur definiert durch

$$MLP(X) = \mu$$

Dann ist die Standardabweichung der lateralen Position in der Spur definiert durch

$$SDLP = \sqrt{MLP[(X - \mu)^2]}$$

In der Praxis (vgl. hierzu auch [110]) wird die mittlere laterale Position in der Spur bestimmt durch den Abstand  $d_i$  zu einem Referenzpunkt (beispielsweise der Fahrbahnrand oder die Fahrbahnmittle) am Messpunkt  $i$ . Die mittlere SDLP aller Probanden mit der Anzahl  $N$  in einem bestimmten Zeitraum, der sich von den Datenpunkten 1 bis  $n$  erstreckt, ist also

$$SDLP = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N SDLP_j$$

mit

$$SDLP_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}$$

wobei für den Probanden  $j$  gilt, dass  $d_i$  der Abstand zum Referenzpunkt am Messpunkt  $i$  ist und  $\bar{d}$  der mittlere Abstand zu diesem Referenzpunkt.

**Qualität der Längsführung** Genauso wie für die Querführung, existiert auch ein objektives Maß für die Qualität der Längsführung des Fahrzeugs. Falls, wie in der oben beschriebenen Folgefahrt, ein Vorderfahrzeug vorhanden ist, wird die Distanz zu diesem oft als ein solches Maß verwendet. Neben dem absoluten Abstand wird auch hier häufig die Standardabweichung des Abstands verwendet [183]. Dabei kann ein größerer Abstand beziehungsweise eine größere Standardabweichung des Abstands als Hinweis auf eine höhere Komplexität der Sekundäraufgabe gesehen werden, da Probanden mit steigenden Anforderungen der Sekundäraufgabe dazu tendieren die Primäraufgabe zu vereinfachen [54]. Insbesondere nach der entsprechenden Instruktion die Fahraufgabe zu priorisieren und den Abstand konstant zu halten, lässt dieses Verhalten darauf schließen, dass die Sekundäraufgabe so viele Ressourcen belegt, dass die Primäraufgabe nur noch eingeschränkt durchgeführt werden kann.

Je nach Aufgabenstellung kann auch (beispielsweise bei nicht vorhandenem Vorderfahrzeug) die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs beziehungsweise deren Standardabweichung verwendet werden [54]. Trotz einer entsprechenden Instruktion die Geschwindigkeit möglichst konstant zu halten, wird diese mit steigender Komplexität der Sekundäraufgabe meist geringer und deren Standardabweichung höher [54].

### *Leistungen in der Sekundäraufgabe*

Um die Komplexität einer Sekundäraufgabe zu messen und damit Hinweise auf deren Ablenkungspotenzial während der Fahrt zu gewinnen, können auch direkt die Leistungen der Sekundäraufgabe erfasst werden. Etablierte Messgrößen hierfür sind die Aufgabenbearbeitungszeit sowie die Fehler, die bei der Aufgabenbearbeitung gemacht werden.

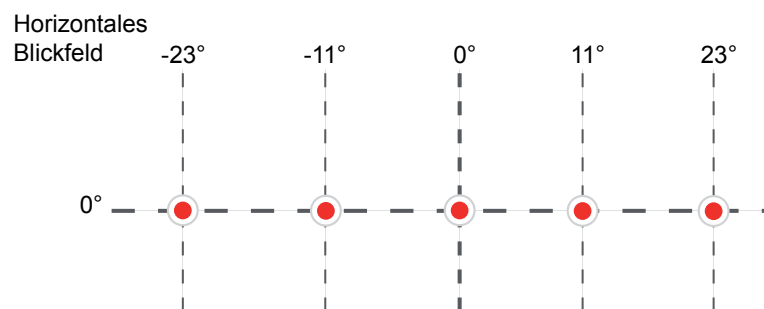
In Situationen, in denen der Mensch zwei Aufgaben gleichzeitig bearbeiten muss, ist er in der Lage bewusst die eine oder andere Aufgabe zu bevorzugen [117]. Dies hat zur Folge, dass in vielen Experimenten zur Evaluation von interaktiven Systemen im Fahrzeug bei steigender Task-Komplexität nur die Sekundärtask-Performance sinkt, während die Fahraufgabe „geschützt“ wird (beispielsweise in [63]). Bei einer Instruktion der Probanden den Fokus auf die Durchführung der Primär- also der Fahraufgabe zu legen, können daher die Leistungen in der Sekundäraufgabe erheblich variieren, während die Systeme keinen Einfluss auf die Fahraufgabe haben. Aus diesen Gründen werden in dieser Arbeit immer sowohl die Leistungen in der Primär- als auch in der Sekundäraufgabe ausgewertet.

### *Peripheral Detection Task*

Der sogenannte Peripheral Detection Task (PDT) wurde von Martens et al. entwickelt, um den Grad der mentalen Auslastung, der durch die Durchführung eines Sekundärtasks entsteht, zu quantifizieren [98, 99]. Basierend auf der Annahme, dass das funktionale Blick-

feld mit steigender kognitiver Last kleiner wird, wird in diesem Verfahren die Fähigkeit des Probanden gemessen auf visuelle Reize in dessen peripheren Blickfeld zu reagieren. Hierzu werden kleine rote Quadrate zwischen  $11^\circ$  und  $23^\circ$  auf der linken Seite einer gedachten Linie zwischen dem Zentrum des Bildschirms für die Fahrszene und den Augen des Fahrers angezeigt. Diese visuellen Reize erscheinen nacheinander mit einem zufälligen zeitlichen Abstand von 3 bis 5 Sekunden. Vertikal werden die Reize zwischen  $2^\circ$  und  $4^\circ$  oberhalb des Horizonts angezeigt. Probanden werden angeleitet, auf diese visuellen Reize möglichst schnell durch Drücken eines am Zeigefinger ihrer dominanten Hand befestigten Knopfes zu reagieren. Anschließend interpretierten die Autoren höhere Reaktionszeiten und eine größere Anzahl an verpassten (entspricht keiner Reaktion) Reizen.

Die in dieser Arbeit verwendete Variante des PDT wurde in Anlehnung an [110] leicht modifiziert. Die wesentlichste Veränderung im Vergleich zur ursprünglichen Version ist hierbei die Ausweitung des Raumes, in dem Reize erscheinen können, um  $11^\circ$  beziehungsweise  $23^\circ$  rechts vom Ursprung sowie die Hinzunahme einer Referenzposition im Zentrum (siehe Abbildung 2.5). Außerdem wurden die Reize über einen Knopf an der linken Seite des Lenkrads bestätigt. Die gewählte Implementierung des PDT entspricht trotz Modifikationen den Empfehlungen der AAM [52].



**Abbildung 2.5:** Der Peripheral Detection Task: Visuelle Reize (hier als rote Punkte dargestellt) erscheinen in zufälligen Zeitabständen an unterschiedlichen Positionen des horizontalen Blickfelds. Die Position, zentral vor dem Fahrer auf der Fahrsimulation wird als Zentrum ( $0^\circ$  horizontal und vertikal) betrachtet.

### Fragebögen

Neben der Erfassung der Leistungen in der Primär- und Sekundäraufgabe können auch Fragebögen wichtige Hinweise auf das Maß und den Ursprung von Ablenkung liefern. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen kommen dabei zum einen speziell für die jeweilige Studie entworfene Fragebögen zum Einsatz. Zum anderen werden folgende standardisierte Fragebögen verwendet.

**NASA (R)TLX** Der Fragebogen NASA Task Load Index (NASA TLX) wurde entwickelt, um die Arbeitsbelastung (englisch Task Load) einer Aufgabe zu quantifizieren [56]. In den für diese Arbeit durchgeführten Studien wurde die Bleistift und Papier-Variante des NASA TLX verwendet. Dabei bewerten Probanden die subjektiv empfundene Anforderung der Aufgabe bezüglich sechs verschiedener Kategorien auf jeweils einer 21-stufigen Likert

Skala. Diese Kategorien sind „geistige“, „physische“ und „zeitliche Anforderungen“, sowie der subjektiv empfundene „Erfolg“, die „Frustration“ und die für die Aufgabenlösung notwendigen „Anstrengungen“. Die 21 möglichen Abstufungen auf jeder Skala repräsentieren einen Wert zwischen 0 und 100 (5 Punkte Abstand). Zur Auswertung können einzelne Kategorien unterschiedlich gewichtet werden, in dieser Arbeit wurden jedoch wie beim später publizierten NASA Raw Task Load Index (NASA RTLX) [55] alle Kategorien gleich stark gewichtet. Die resultierende Punktezahl entspricht somit dem arithmetischen Mittel über alle Kategorien und hat einen Wert zwischen 0 und 100. Eine weitere Variante des NASA TLX, welche speziell für die Messung der Auslastung (Workload) während der Fahrt entwickelt wurde, ist der Driving Activity Load Index (DALI) [119]. Dieser findet bei den in dieser Arbeit beschriebenen Studien jedoch keine Anwendung, da beispielsweise die gemessene auditive Belastung für die evaluierten Konzepte keinerlei Relevanz besitzt.

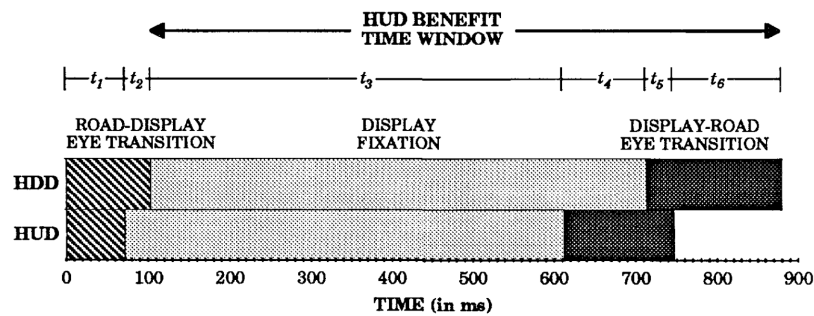
**System Usability Scale** Ein weiterer, in dieser Arbeit verwendeter Fragebogen ist der System Usability Scale (SUS) [21]. Der SUS wurde für die schnelle Evaluation der grundsätzlichen Benutzbarkeit eines Systems entwickelt. Hierzu wird ein System in 10 Kategorien auf einer jeweils fünfstufigen Likert-Skala („Sehr starke Ablehnung“ bis „Sehr starke Zustimmung“) bewertet. Die Fragen zielen dabei auf allgemeine Aspekte der Systemnutzung ab, wie beispielsweise die Komplexität und die Konsistenz des Systems, die Einfachheit sowie die Erlernbarkeit der Bedienung und das für die Nutzung benötigte Vorwissen [21].

## 2.2 Head-Up Displays im Fahrzeug

### 2.2.1 Informationsdarstellung im primären Sichtfeld des Fahrers

Das HUD, dessen Funktionsweise bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben wurde, ist für den Einsatz im Fahrzeug bereits vergleichsweise gut erforscht. Als einer der Hauptvorteile eines HUD wird dabei ein zeitlicher Vorteil in der Wahrnehmung von Information im Vergleich zu anderen im Fahrzeug verbauten Bildschirmen gesehen. In einer Studie von Kiefer wird das Ablesen der Geschwindigkeit auf einem HUD mit einem Kombiinstrument verglichen [73]. Die für die beiden Ablesevorgänge benötigten Zeiten sind in Abbildung 2.6 dargestellt.

Während des Ablesens der Information wird zwischen drei unterschiedlichen Phasen unterschieden: Zunächst blickt der Fahrer mit Hilfe einer entsprechenden Augen- beziehungsweise Kopfbewegung auf den entsprechenden Bildschirm (erster Bereich in der Grafik), darauf folgt die Fixation des Bildschirms sowie der eigentliche Ablesevorgang (zweiter Bereich in der Grafik) und abschließend die entsprechende Augenbewegung zurück auf die Straße (dritter Bereich in der Grafik). Nicht berücksichtigt wurde dabei die Zeit, die zur erneuten Fixation der Straße benötigt wird. Neben der Tatsache, dass die gesuchte Information in der HUD Bedingung 134 ms schneller abgelesen werden konnte, liegt ein weiterer interessanter Aspekt hier in der unterschiedlichen Länge der genannten Phasen. Neben den



**Abbildung 2.6:** Das *HUD Benefit Time Window* nach Kiefer [73]. Vergleich der Ablesevorgänge in HUD (unterer Balken) und Kombiinstrument (oberer Balken). Grafik aus [73].

(eher geringen) Einsparungen in der ersten und dritten Phase, liegt laut Kiefer ein besonders hoher Anteil der Einsparungen in der schnelleren Fixation der HUD-Information.

Dieser Zeitvorteil scheint sich sogar in sehr komplexen Verkehrssituationen noch zu verstärken. Während in einer späteren Studie von Ablassmeier et al. für wenig komplexe Verkehrssituationen die Information auf dem HUD nur etwa 15-20% schneller abgelesen werden konnte, betrug dieser Vorteil zugunsten des HUD in komplexeren Situationen bis zu 25% [1]. Die Vorteile durch die schnellere Umfokussierung zwischen HUD und Straßenszene können sich auch, wie Sojourner in einer späteren Studie feststellte, in unvorhergesehenen Situationen positiv auswirken [152]. Hier reagierten die Probanden signifikant schneller auf einen entsprechenden Reiz in der Fahrszene wenn die aktuelle Geschwindigkeit auf dem HUD angezeigt wurde, als wenn diese vom Kombiinstrument abgelesen werden musste. Gleiche Ergebnisse erzielte auch Horrey bei der Durchführung einer Studie, in der möglichst schnell Nummernfolgen von einem HUD beziehungsweise einem entsprechenden unterhalb des Sichtfelds verbauten Bildschirm abgelesen werden sollten [61]. Den Ergebnissen dieser Studie zufolge konnte die Sekundäraufgabe unter Benutzung des HUD signifikant schneller bearbeitet werden als bei Anzeige auf dem Vergleichsbildschirm. Weiterhin reagierten die Probanden auf kritische Situationen bei Darstellung auf dem HUD signifikant schneller, als wenn ein herkömmlicher Bildschirm benutzt wurde.

Jedoch werden bei allen Vorteilen, die diese Technologie zu bieten scheint, immer wieder auch Verhaltensweisen festgestellt, die auch negative Effekte auf die Verwendung im Fahrzeug haben könnten. So nimmt bei der Benutzung eines HUD nicht nur die Ablesegeschwindigkeit, sondern auch die Häufigkeit der Ablesevorgänge zu [155]. Dieses Ergebnis konnte auch in einer entsprechenden Langzeitstudie bestätigt werden, bei der etwa 30% mehr Blicke auf das HUD registriert wurden, als bei einer Referenzmessung mit dem Kombiinstrument [47]. Dennoch, so wurde zumindest in dieser Studie festgestellt, war die Gesamtablenkungsdauer der kumulierten Blickabwendungen auf das HUD nicht länger als bei der Verwendung des Kombiinstrumentes [47].

Problematisch bei der Informationsdarstellung im HUD werden auch immer wieder die unter dem Begriff *Cognitive Tunneling* bezeichneten Effekte gesehen. Dieser Begriff bezeichnet die (unbeabsichtigte) Fixierung mentaler Ressourcen auf eine Informationsquelle auf Kosten der gleichzeitigen Wahrnehmung anderer Informationsquellen [167]. Dies be-

deutet letztlich, dass der Mensch offenbar nicht in der Lage ist, sowohl die Information auf dem HUD selbst, als auch die hinter dem HUD liegende Szene gleichzeitig und ohne Informationsverlust zu verarbeiten [173]. Entsprechende Hinweise auf einen möglichen Verlust der Wahrnehmung der realen Szene hinter dem HUD wurde im Kontext der Luftfahrt in mehreren Simulatorstudien gesammelt (beispielsweise [45, 104]). Auch im Fahrzeugkontext wurden Ergebnisse aus Probandenstudien mit diesem Phänomen in Zusammenhang gebracht. So gelang es Probanden zwar besser eine vorgegebene Geschwindigkeit einzuhalten, wenn diese auf dem HUD angezeigt wurde, jedoch verschlechterten sich gleichzeitig die Spurhaltewerte [53]. Der eindeutige Nachweis, dass *Cognitive Tunneling* tatsächlich für diese Resultate verantwortlich ist, wurde allerdings nicht erbracht. Vergleichbare Effekte entstanden beispielsweise auch, wenn die Information im HUD an einer ungünstigen Position dargestellt wurde und relevante Elemente im Hintergrund somit verdeckte [44].

Weiterhin wurde vermutet, dass die gestörte Informationsaufnahme möglicherweise mit einer Überbelastung des visuellen Kanals in Zusammenhang stehen könnte. Diese Theorie deckte sich mit dem Multiple-Resource-Modell von Wickens, ein Modell, das die verschiedenen Modalitäten bei der Informationsaufnahme des Menschen berücksichtigt [174]. Laut diesem Modell verfügt der Mensch nur über eine begrenzte Anzahl an Ressourcen, die er für die Aufnahme von Information gleichzeitig einsetzen kann. Diese Ressourcen werden Anhand der Dimensionen Modalität (Visuell, Auditiv), Code (Räumlich, Sprachlich) und den Stadien der Informationsverarbeitung (Wahrnehmung, Verarbeitung, Antwort) aufgespannt. Entscheidend, ob zwei oder mehr Aufgaben zur selben Zeit abgearbeitet werden können (beispielsweise Autofahren und eine Sekundäraufgabe), ist unter anderem, ob diese Aufgaben dieselbe Ressource belegen oder nicht [174]. Da das Autofahren eine relativ hohe visuelle Komplexität besitzt, könnte eine gleichzeitige Darstellung visueller Information im direkten Blickfeld diese Ressource überstrapazieren und somit die effektive Informationsaufnahme verhindern. In dem Modell von Wickens existiert allerdings noch eine (gekapselte) vierte Dimension: so kann die visuelle Wahrnehmung entweder fokal oder ambient sein [174]. Obwohl beide Informationen den visuellen Kanal belegen, können diese beiden Arten der visuellen Informationsaufnahme laut Wickens durchaus gleichzeitig effektiv genutzt werden. Allerdings ist bisher nicht abschließend geklärt, ob und warum dies möglich ist. Vorstellbar ist, dass ambiente Wahrnehmung andere Ressourcen belegt als fokale [174]. Als eine weitere Erklärung nennt Wickens die Möglichkeit, dass ambiente Wahrnehmung überhaupt keine Ressourcen belegt, sondern präattentiv passiert [174]. Diese Theorie wird jedoch in weiteren Studien bestätigt: so erklären sich auch Horrey et al. die Ergebnisse ihres Versuches damit, dass ambientes und fokales Sehen wohl sehr gut gleichzeitig genutzt werden könnten [63]. Diese Vermutung sehen Horrey et al. im Lichte der Ergebnisse einer weiteren Studie bestätigt [62] und integrieren die Unterscheidung zwischen fokalem und ambienten Sehen schließlich auch in ihr Saliency, Effort, Expectancy, Value Model (SEEV Model), welches benutzt werden kann, um visuelle Aufmerksamkeit zu modellieren [64].

Letztlich bleibt festzuhalten, dass Information auf einem HUD somit auf keinen Fall beliebig dargestellt werden darf, sich bei korrekter Nutzung jedoch durchaus Vorteile ergeben. Für das Fahrzeug wird beispielsweise empfohlen Information nur dann einzublenden, wenn sie auch benötigt wird [37]. Der hierzu notwendige aktuelle Nutzungskontext kann nach Ecker sowohl implizit, das heißt durch Nutzung beispielsweise der Blickdaten des Fah-

thers, als auch explizit, also beispielsweise ausgelöst durch eine konkrete Bedienhandlung, erstellt werden [37]. Prinzel empfiehlt drei Strategien zur korrekten Nutzung des HUD [125]:

So könne die Nutzung „echter“ Augmented Reality, also die Anzeige der Information an dem Ort, an dessen Kontext sie auch sinnvoll ist (vergleiche hierzu auch Kapitel 2.3.1), eventuelle Probleme mit der Wahrnehmung der Hintergrundszene vermeiden. Weiterhin sollte parallel nutzbare Wahrnehmung, wie etwa periphere und fokale visuelle Wahrnehmung, auch ausgenutzt werden und drittens könne *Attention Capture* auch verhindert werden, wenn direkt auf wichtige Informationen in einer der beiden Domänen (virtuelle Information beziehungsweise reale Szene) aufmerksam gemacht werde. Letztere Empfehlungen stammen allerdings aus der Luftfahrt und können wohl nicht unverändert auf den Automobilkontext übertragen werden. Tönnis et al. untersuchten Augmented Reality-Anzeigen im Fahrzeug und versuchten den Fahrer durch virtuelle Markierungen auf der Fahrbahn bei der Spurhaltung und durch die visuelle und ortsgenaue Anzeige des Bremspunkts bei der Abstandshaltung zu unterstützen [163]. Dabei stellten sie in einer Studie, in der sie mehrere Visualisierungen unterschiedlicher Komplexität verglichen hatten, fest, dass auch hier ab einer bestimmten Anzeigenkomplexität Nachteile für die Durchführung der Primäraufgabe zu erwarten sind und raten daher zu möglichst einfachen beziehungsweise grafisch reduzierten Anzeigen [163].

### 2.2.2 Interaktion mit Inhalten auf Head-Up Displays

Wenn die Anzeige von Information auf einem HUD Vorteile bezüglich des Blickverhaltens des Fahrers im Vergleich zu anderen Bildschirmen im Fahrzeug impliziert, so könnte dies auch für die Interaktion mit Inhalten zutreffen. Um dies zu untersuchen, wurde die Interaktion mit Listen, also die Auswahl eines bestimmten Listenelements aus einer Menge von vertikal angeordneten Elementen, im HUD und im CID verglichen [111]. Diese Art von Anwendungsfällen wurde in der entsprechenden Studie signifikant schneller auf dem HUD bearbeitet, als es auf dem CID gelang. Gleichzeitig wurde eine signifikant niedrigere Anzahl von PDT-Reizen verpasst, während die Reaktion auf diese Reize signifikant schneller war. Auch die Spurhaltung gelang teilweise signifikant besser (oder es konnte kein Unterschied festgestellt werden), wenn im HUD interagiert wurde als wenn dies im CID geschah. Bei komplexeren Aufgaben, wie dem Schreiben von Text oder Zahlen wurden dabei allerdings im HUD die von der AAM empfohlenen Obergrenzen für die Blickabwendungszeiten überschritten.

Miličić folgert daher, dass einfache Use Cases im HUD Vorteile bieten, bei komplexeren Aufgaben hingegen möglicherweise Nachteile zu erwarten sind [111]. Die Interaktion mit Listen auf einem HUD wurde in einer späteren Studie von Weinberg et al. untersucht und mit der identischen Interaktion auf einem in der Mittelkonsole verbauten Bildschirm verglichen. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Fahrleistungen ermittelt werden. Allerdings betrug die Anzahl der durchschnittlichen Blickabwendungen in der HUD Bedingung etwa die Hälfte der Blickabwendungen, die in der Vergleichsbedingung notwendig waren.

Zu einer etwas negativeren Einschätzung kamen Dicke et al. in einer Studie, in der sie die Interaktion mit Anwendungsfällen unterschiedlicher Komplexität auf einem HUD und über Sprache verglichen [30]. Hierbei erzielte die Interaktion über Sprache, beziehungsweise die sprachgestützte Interaktion auf dem HUD, bessere Ergebnisse als die rein visuelle Ausgabe auf dem HUD. Allerdings ist hier zu bemerken, dass das HUD an einer eher ungünstigen Stelle über der Mittelkonsole (anstatt vor dem Fahrer) angebracht war und die Informationen nicht mit optimalem Kontrast (für Empfehlungen siehe beispielsweise [165]) angezeigt wurden.

Miličić hält in einer späteren Publikation fest, dass die Interaktion mit einfachen Inhalten auf einem HUD wohl möglich und auch vorteilhaft sein kann, jedoch darauf geachtet werden müsse, dass die empfohlene Maximaldauer für die Blickabwendungen nicht überschritten wird [110]. Dies wird in einer späteren Arbeit von Ecker bestätigt [37]. Er kommt zu dem Schluss, dass die Interaktion mit langen Listen im HUD wohl ein höheres Maß an visueller Aufmerksamkeit benötigen, was sich auch in den von ihm durchgeführten Studien in längeren Blickabwendungen widerspiegelt. Allerdings stellt er auch fest, dass in den von ihm durchgeführten Studien das HUD den Anzeigeorten CID und Kombiinstrument bezüglich Fahrleistung, Aufgabenbearbeitungszeit und subjektiver Präferenz der Studienteilnehmern meist signifikant überlegen ist. Ecker folgert daher, dass die entsprechenden Richtlinien bezüglich der Blickabwendungszeiten für die Interaktion mit einem HUD überarbeitet werden müssten.

## 2.3 Mixed Reality und Head-Mounted Displays

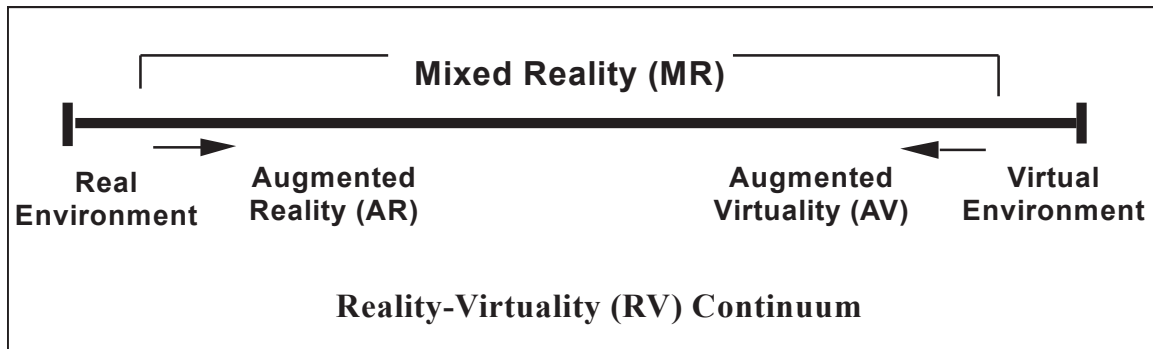
Head-Up Displays sind letztlich lediglich eine Ausprägung der sogenannten *optical see-through displays* [109]. Da diese Bildschirme auf einer Projektionstechnik basieren, erlauben sie es einem Betrachter gleichzeitig die dahinterliegende (reale) Welt, sowie auch die auf dem eigentlichen Bildschirm dargestellte Information zu sehen. Diese Art der Informationsdarstellung, also die Mischung von realen und virtuellen Elementen, wird auch als Mixed Reality (MR) bezeichnet [109]. Weitere Anzeigegeräte, mit denen es möglich ist *Mixed Reality* darzustellen, sind die in dieser Arbeit behandelten Head-Mounted Displays (HMDs), oder Datenbrillen [186]. In diesem Kapitel werden nach einer kurzen Abgrenzung der Begriffe *Augmented Reality* und *Mixed Reality* verschiedene Bauformen von Datenbrillen, grundsätzliche Anzeigemöglichkeiten und Interaktionsprinzipien und deren Folgen für die Benutzung dargestellt.

### 2.3.1 Augmented Reality und Mixed Reality

Generell kann Mixed Reality als ein Raum auf dem sogenannten Reality-Virtuality-Continuum (siehe Abbildung 2.7) definiert werden [109].

Die Pole in diesem Kontinuum beschreiben auf der einen Seite die reale Umgebung und auf der anderen Seite die virtuelle Umgebung. Der Raum zwischen diesen beiden Polen wird als Mixed Reality bezeichnet, in dem aber wiederum zwischen der sogenannten Augmented





**Abbildung 2.7:** Das Reality-Virtuality (RV) Continuum nach Milgram [109]. Grafik aus [109].

Reality (AR) und der Augmented Virtuality (AV) unterschieden werden kann. Die Abgrenzung zwischen AR und AV wird dadurch geschaffen, ob in einem System die Umgebung des Nutzers prinzipiell real ist und mit virtuellen Inhalten lediglich ergänzt wird (AR) oder ob die Umgebung vollkommen virtuell, also computergeneriert ist und mit „realen“ Inhalten ergänzt wird (AV). Als ein Beispiel für das letztgenannte Prinzip nennt Milgram eine virtuelle Umgebung, in die die (echte) Hand des Nutzers eingebunden wird, mit der dann mit den virtuellen Inhalten interagiert werden kann (siehe [160]).

Eine weitere Definition von AR stammt von Ronald Azuma [10]. Er formuliert drei Eigenschaften, die seiner Definition zufolge von einem System erfüllt sein müssen, damit es zur Klasse der AR-Systeme gehört:

1. Reale und virtuelle Inhalte werden kombiniert.
2. Das System ist interaktiv in Echtzeit.
3. Virtuelle Inhalte sind im dreidimensionalen Raum registriert.

Diese Definition stellt bis heute den Grundstein für die Einordnung von Systemen in die Augmented Reality dar. Im Rahmen dieser Arbeit, beziehungsweise bei den hierfür entwickelten Konzepten wird allerdings kein Versuch einer Einordnung unternommen, sondern immer neutral von Anwendungen der Mixed Reality gesprochen. Die Mischung der Unterschiedlichen Technologien HUD und Datenbrille würde eine Einordnung teilweise unmöglich machen. Eine fahrtunterstützende Anzeige (Navigation, Geschwindigkeit) beispielsweise wäre, wenn sie auf dem HUD angezeigt wird, nicht im 3D-Raum registriert und somit kein AR. Auf der Datenbrille könnte diese Anzeige jedoch mittels einer Positionserfassung des Kopfes stabil an demselben Ort wie das HUD angezeigt werden, womit alle Kriterien von Azuma erfüllt wären. Eine konzeptionelle Einordnung, die letztlich von der verwendeten Anzeigetechnologie abhängig ist, für den Nutzer jedoch im Optimalfall die identische Anzeige bereitstellt, erscheint hier jedoch nicht sinnvoll.

### 2.3.2 Head-Mounted Displays: Designs und Folgen für die Benutzung

Head-Mounted Displays beziehungsweise Datenbrillen lassen sich, je nach Bauweise und dem zugrunde gelegten optischen Prinzip in unterschiedliche Kategorien einteilen. Zunächst wird zwischen sogenannten *optical see-through* und *video see-through* Datenbrillen unterschieden [10]. Diese unterscheiden sich durch das Prinzip der Kopplung des realen Bildes mit den virtuellen Inhalten. *Optical see-through* Datenbrillen sind so konstruiert, dass die Gläser, in die die virtuellen Bildinformationen eingebracht werden, eine Restdurchlässigkeit für das Licht beziehungsweise die Information der dahinterliegenden realen Welt besitzen. Dadurch kann ein Nutzer diese zu jedem Zeitpunkt unverfälscht wahrnehmen. Virtuelle Inhalte werden mittels halbtransparenter Spiegel und Linsen zunächst in das transparente Medium hinein- und zur Betrachtung durch den Benutzer auch wieder aus diesem entkoppelt. Im Gegensatz dazu besitzen *video see-through* Datenbrillen keine Lichtdurchlässigkeit von außen. Stattdessen wird die Umgebung des Nutzers aus dessen Blickwinkel durch eine Kamera gefilmt, mit den virtuellen Inhalten gemischt und das entstehende Bild auf einem Display vor den Augen des Nutzers angezeigt. Da durch dieses Verfahren, nicht nur die virtuellen Inhalte sondern auch die reale Umgebung des Nutzers immer erst mit einer gewissen Latenz auf dem Bildschirm angezeigt werden kann, eignen sich diese Datenbrillen nicht für den Einsatz im Fahrzeug. Daher werden in dieser Arbeit ausschließlich *optical see-through* Datenbrillen verwendet.

Je nach Bauweise kann weiterhin zwischen monokularen, bi-okularen und binokularen Datenbrillen unterschieden werden [118, 178]. Der transparente Anzeigebereich einer monokularen Datenbrillen überdeckt dabei lediglich ein Auge des Benutzers. Bei den Datenbrillen, welche das Bild für beide Augen des Benutzers mit virtuellen Inhalten anreichern können, wird wie folgt differenziert:

Binokulare Datenbrillen sind dazu in der Lage ein unterschiedliches Bild für beide Augen anzuzeigen und somit die stereoskopische Anzeige dreidimensionaler Bilder zu ermöglichen [118, 178]. Bi-okulare Datenbrillen zeigen hingegen für beide Augen ein identisches Bild an [118, 178].

Monokulare Datenbrillen benötigen aufgrund ihrer Bauweise lediglich einen Bildgenerator, ein Glas und eine entsprechend kleiner dimensionierte Energieversorgung, weswegen sie hauptsächlich wegen ihres dadurch resultierenden, geringeren Gewichts ergonomische Vorteile besitzen. Allerdings resultieren aus der Tatsache, dass nur das Bild für ein Auge mit virtuellen Inhalten angereichert wird, auch zahlreiche wahrnehmungsspezifische Probleme. Eines dieser Probleme liegt in der unterschiedlichen Augendominanz der Menschen [80]. Nur etwa 30% der Menschen sind auf dem linken Auge dominant, der Rest verfügt über eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Dominanz auf dem rechten Auge [105]. Grundsätzlich wird empfohlen ein monokulares System über dem dominanten Auge zu tragen [80], wodurch nicht das gleiche System von allen Menschen genutzt werden kann.

Ein weiteres Problem ist die sogenannte *binocular rivalry*. Es tritt auf, wenn sich die Bilder auf beiden Augen stark unterscheiden, zum Beispiel in ihrer Farbe, Bewegungsrichtung, Orientierung, Auflösung oder gar bezüglich der dargestellten Objekte [17]. Letztlich kann

dies dazu führen, dass es bei dem Träger der Datenbrille zu Phasen wechselnder Augendominanz kommt [17] oder dass entweder das reale Bild, häufig aber auch die virtuellen Inhalte vollkommen exklusiv wahrgenommen werden [127]. Dieser Zustand wird von vielen Menschen als äußerst unangenehm empfunden und kann letztlich zu der Vermeidungsstrategie führen zeitweise ein Auge zu schließen [127].

Doch es gibt auch Probleme, die nicht nur monokulare Systeme betreffen. So fällt es vielen Menschen schwer bei der gleichzeitigen Wahrnehmung virtueller Inhalte und realer Umgebung zwischen diesen beiden Domänen klar zu trennen (sogenannte *visual interference*). Letztlich kann dies dazu führen, dass die Leistungen für eine auf der Datenbrille angezeigten Aufgabe sich signifikant verschlechtern [80]. Ein weiteres Problem ist, dass existierende Datenbrillen nicht in der Lage sind Inhalte in unterschiedlichen Distanzen anzuzeigen, während die Objekte der realen Welt jedoch in vollkommen unterschiedlichen Distanzen angeordnet sind [80]. Ein weiteres Problem hängt mit der statischen Position der Datenbrille vor dem menschlichen Auge zusammen. Ändert man die Blickrichtung nur ein wenig, wäre das typische Blickverhalten des Menschen, dass zunächst lediglich die Augen bewegt werden, worauf wenig später eine entsprechende Kopfdrehung folgt [139]. Zum Ablesen der Inhalte auf der Datenbrille, auch wenn diese etwas voneinander entfernt sind, können jedoch lediglich die Augen genutzt werden [80]. Daher wird zumindest für monokulare Datenbrillen empfohlen, Inhalte nicht weiter als 10° außerhalb des Zentrums zu platzieren [120]. Schließlich wurde beobachtet, dass durch das Tragen von Datenbrillen die *Phorie*, also der Zustand den die Augen einnehmen, wenn sie nichts fokussieren, für einen gewissen Zeitraum verändert werden kann [112, 120].

Unabhängig von der Bauweise gilt für Datenbrillen, dass die räumliche Ausdehnung ihres Anzeigebereichs möglichst dem Blickfeld des Menschen entsprechen sollte, um dieses möglichst realistisch mit virtuellen Inhalten anreichern zu können [106]. Dies ist jedoch heute aus technischer Sicht noch nicht möglich. Weiterhin sollte das Blickfeld des Menschen durch die Bauweise der Datenbrille nicht unnötig verkleinert werden. Als eine Mindestanforderung formulieren Keller et al. einen Bereich von 60° vertikal und 75° horizontal des Blickfelds des Menschen unverdeckt zu lassen [72].

Für den Einsatz im Fahrzeug gibt es keine Empfehlungen für eine Bauform einer Datenbrille. Für eine bi-okulare (beziehungsweise binokular wenn eine stereoskopische Anzeige notwendig ist) Bauweise spricht, dass die angesprochenen Probleme der monokularen Variante nicht auftreten [106]. Außerdem besitzen sie einen höheren Betrachtungskomfort, als monokulare Datenbrillen [107]. Letztlich muss für eine dauerhafte Nutzung im Fahrzeug jedoch die Größe und das Gewicht monokularer Datenbrillen erreicht werden. Monokulare Datenbrillen könnten noch einen weiteren wichtigen Vorteil haben. Da im Falle einer Fehlfunktion des Systems der gesamte Anzeigebereich hell erleuchtet werden könnte, würde im Falle der monokularen Bauweise wenigstens ein Auge von dieser Fehlfunktion nicht betroffen sein.

### 2.3.3 Referenzkoordinatensysteme

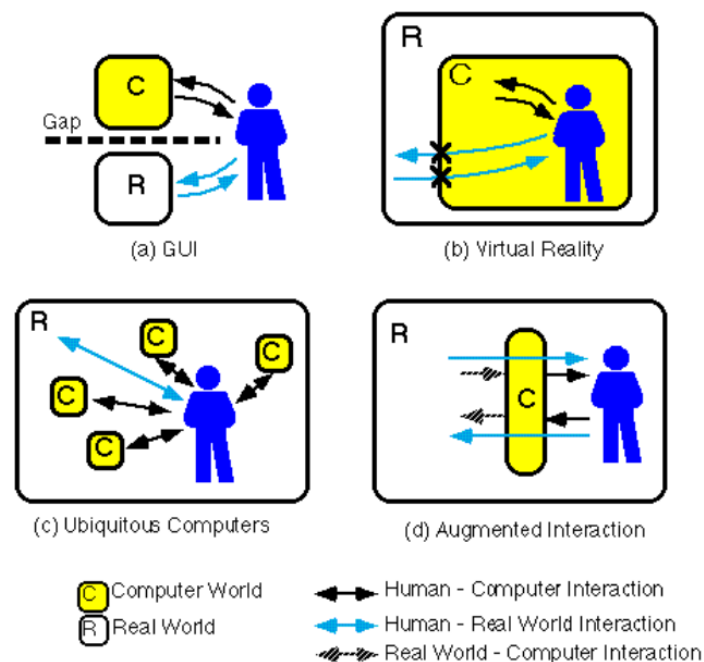
Bei der Anzeige von Inhalten auf der Datenbrille können diese in unterschiedlichen Referenzkoordinatensystemen positioniert werden. Billinghurst unterscheidet hier zwischen den Begriffen bildschirmstabil (*screen-stabilized*), körperstabil (*body-stabilized*) und weltstabil (*world-stabilized*) [16]. Bildschirmstabile Anzeigen, im Falle einer Datenbrille aufgrund der identischen Koordinatensysteme auch kopfstabile Anzeigen genannt, stellen hier die technisch einfachste Form der Anzeige dar. Inhalte werden unabhängig von der Kopfposition des Nutzers immer an der gleichen Position auf dem Bildschirm angezeigt. Analog hierzu werden körperstabile Anzeigen immer im Bezug auf die aktuelle Position und Orientierung des Nutzer-Körpers dargestellt. Ein Beispiel hierfür ist ein virtueller Gegenstand, der sich immer auf Hüfthöhe rechts neben dem Körper des Nutzers befindet. Weltstabile Inhalte hingegen werden in Relation zu dem Koordinatensystem der Umgebung angezeigt, beispielsweise also immer in einer bestimmten Ecke eines Raumes. Außerdem können Inhalte auch immer in Relation zu einem bestimmten Objekt dargestellt werden, hier wird auch von objektreferenzierten (*object-referenced*) Anzeigen gesprochen (beispielsweise in [172]). Für weltstabile und objektreferenzierte Inhalte wird, besonders in der deutschen Literatur, auch teilweise der Begriff *kontaktanalog* verwendet [65, 66, 149]. In dieser Arbeit werden jedoch die üblichen Bezeichnungen aus dem englischsprachigen Raum verwendet, da diese durch die Benennung des jeweiligen Referenzkoordinatensystems präziser sind.

Wird für die angezeigten Inhalte ein anderes Referenzkoordinatensystem als der Kopf, beziehungsweise der Bildschirm der Datenbrille gewählt, ist es notwendig mindestens die Kopfposition des Nutzers innerhalb des entsprechenden Koordinatensystems zu bestimmen, da beispielsweise bei einer Kopfdrehung die Inhalte im Anzeigebereich der Datenbrille entsprechend repositioniert werden müssen. Für objektreferenzierte Anzeigen muss zusätzlich die Position des entsprechenden Objekts in Relation zum Koordinatensystem der Datenbrille bestimmt werden. Diese Positionserfassung des Kopfes oder anderer Objekte wird immer noch als eine große Herausforderung für die Realisierung dieser Stabilisierungsformen gesehen [176]. Da hier sehr hohe Genauigkeits- und Geschwindigkeitsansprüche bestehen und eine Reihe potenzieller Fehlerquellen vorliegen (siehe beispielsweise [60]), widmet sich ein Großteil der Forschung möglichen Verbesserungen dieser Techniken (beispielsweise [71, 150]). Eine besondere Rolle nimmt dabei die Latenz zwischen einer tatsächlichen Bewegung eines der Koordinatensysteme und der entsprechenden Reaktion der Inhalte auf der Datenbrille ein. Der Mensch ist in der Lage Latenzunterschiede bereits von etwa 15 ms wahrzunehmen [97]. In einer Studie wurde festgestellt, dass ab einer Gesamtlatenz von 225 ms die Leistungen in einer Zeigeaufgabe bereits signifikant abnehmen [96]. Für die Benutzung einer Datenbrille ist die zulässige Gesamtlatenz für ein System vor allem abhängig von der Geschwindigkeit der durchgeführten Bewegung (beispielsweise die Winkelgeschwindigkeit der Kopfdrehung) und der für den Anwendungsfall erforderlichen Genauigkeit der Position eines virtuellen Objekts. So verursacht beispielsweise eine Kopfbewegung mit einer Geschwindigkeit von 50° pro Sekunde bei einer Systemlatenz von 100 ms bereits einen Winkelfehler von 5° [7]. Soll beispielsweise ein reales Objekt in 10 Metern Entfernung ortsgenau mit einem virtuellen Objekt überlagert werden, würde dies bereits zu einer (temporären) Abweichung der gewünschten Position von knapp 90 cm führen. Ei-

ne auf theoretischen Überlegungen beruhende Empfehlung für die maximale Latenz eines Systems lautet, dass diese unter 80 ms gehalten werden solle [9].

### 2.3.4 Mensch-Maschine Interaktion auf einer Datenbrille

Wenn auf einer Datenbrille nicht nur Inhalte angezeigt, sondern auch manipuliert werden sollen, müssen sowohl eine geeignete Interaktionsmodalität gewählt, als auch passende Metaphern und Techniken entwickelt werden. Traditionell orientieren sich die für Datenbrillen gewählten Interaktionstechniken stark an denen, die aus der Desktop oder virtuellen Realität bekannt sind [8]. Allerdings sind durch die Mischung von realen und virtuellen Inhalten, sowie durch die spezielle Anzeige von Inhalten unmittelbar im Blickfeld des Nutzers einige Besonderheiten zu beachten. Abbildung 2.8 (d) zeigt, wie sich durch den Einsatz dieser Techniken ein neues Interaktionsparadigma, die Augmented Interaction, herausgebildet hat.



**Abbildung 2.8:** Interaktion in unterschiedlichen Paradigmen der Mensch-Maschine Interaktion nach Rekimoto [133]. Grafik aus [133].

Im Unterschied zu anderen Paradigmen der Mensch-Maschine Interaktion (Grafische Benutzungsschnittstelle (a), Virtuelle Realität (b), Ubiquitous Computing (c)) wird bei der Augmented Interaction versucht, Informationen aus der Umgebung des Benutzers als Systemeingabe zu verwenden und so explizite Interaktion mit dem System zu reduzieren [133].

**Interaktionsmodalitäten** In vielen AR-Systemen wird die Ausrichtung der Brille in Relation zur Umwelt ausgenutzt, um eine Systemeingabe vorzunehmen. Der Nutzer dreht dabei den Kopf so, dass sich ein bestimmtes Objekt der realen Welt oder ein entsprechend überlagerndes, virtuelles Objekt in einem bestimmten Bereich der Anzeigefläche der Datenbrille befindet und kann es so beispielsweise selektieren (siehe beispielsweise [42, 59,

130, 133]). Die Interaktion mit weltstabilen oder objektreferenzierten Inhalten besitzt allerdings für diese Arbeit zunächst keine Relevanz. Für die Bedienung von ADAS und IVIS während der Fahrt werden stattdessen menübasierte Interaktionstechniken in Betracht gezogen. Als geeignete Interaktionsmodalitäten für diese Art von Inhalten wurden bislang vor allem proprietäre Zeigergeräte (wie ein Trackball [132], ein Touchpad [130] oder ein interaktiver Stift (Stylus) [59]) verwendet. Auch die wenigen kommerziell erhältlichen Datenbrillen nutzen für die Interaktion mit Menüs Touchpads: Google Glass besitzt ein im Bügel der Brille integriertes Touchpad und auch der Epson Moverio Datenbrille liegt ein externes Touchpad bei.

In einigen Forschungsarbeiten wurden auch immer wieder Eingabemodalitäten speziell für einen Anwendungsfall entwickelt und so der Versuch unternommen die Interaktion mit den Inhalten auf der Datenbrille zu verbessern. So wurden beispielsweise Handschuhe entwickelt, welche in der Lage sind Fingergesten zu erkennen und so eine Benutzereingabe abzuleiten [24, 122]. Für eine weitere Anwendung wurde ein mit virtuellen Inhalten angereichertes Brett verwendet, welches in der einen Hand des Benutzers gehalten und mit einem in der anderen Hand geführten Stift bedient wird (Personal Interaction Panel [146]). Besonders für kollaborative Anwendungen sind Interaktionssysteme geeignet, welche die Information an ein physikalisches Objekt (wie einen Marker) bindet (beispielsweise [123]). Die Verwendung von Markern bietet sich ebenfalls an, wenn auf die Mitführung weiterer technischer Geräte verzichtet werden soll. Zur Aktivierung der Menüs können dann beispielsweise Schüttelgesten zum Einsatz kommen [172]. Auch die Bedienung der Inhalte mittels direkter Handgesten wurde bereits untersucht [41]. Problematisch ist hierbei allerdings das Fehlen einer haptischen Rückmeldung bei gleichzeitig schlechter Tiefenwahrnehmung der halbtransparenten Objekte (vergleiche [27]), sowie die Tatsache, dass Inhalte durch die interagierende Hand verdeckt werden [41].

Eine weitere Interaktionsmodalität, die für die Benutzung von Systemen auf einer Datenbrille in Frage kommt, ist Sprache. Diese kann entweder exklusiv (wie beispielsweise in [144]) oder in einem multimodalen System (wie beispielsweise in [76]) eingesetzt werden. Auch hier gibt es allerdings Situationen, in denen die Benutzung von Sprache problematisch ist, beispielsweise in einer sehr lauten Umgebung oder wenn die Interaktion durch das Umfeld nicht gestattet wird [76].

Grundsätzlich bietet sich zur Interaktion mit Inhalten in einer Datenbrille während der Fahrt, die Nutzung der Infrastruktur im Fahrzeug an. Durch das Vorhandensein zahlreicher indirekter Interaktionsmodalitäten (Drehdrucksteller, Multifunktionslenkrad), die ohnehin auf die Bedienung während der Fahrt ausgelegt sind, muss kein zusätzliches Eingabegerät mitgeführt werden. Zusätzlich bietet der abgeschlossene, enge Raum eines Fahrzeugs eine hervorragende Basis zur Integration zusätzlicher Sensorik, beispielsweise zur Erkennung von Handgesten oder Sprache. Damit entfällt eine der Haupt-Herausforderungen bei der Nutzung mobiler, interaktiver Datenbrillen-Systeme.

**Referenzierung der Menüs** Wie auch bei der Anzeige von sonstigen Inhalten in der Datenbrille, gibt es, je nach Wahl des Referenzkoordinatensystems, theoretisch vier verschiedene Möglichkeiten Menüs in der Datenbrille anzuzeigen [28]. Welches Referenzkoordinatensystem letztlich gewählt wird, ist oft abhängig vom Anwendungsfall. Gehört das Menü logisch zu einem Gegenstand, wie beispielsweise ein Telefonbuch zu einem Tele-

fon, wird es oft bei dem entsprechenden Objekt, also objektreferenziert angezeigt. Diese Möglichkeit wird beispielsweise beim Personal Interaction Panel gewählt, da hier das Menü logisch zum Interaktionstablett gehört [146]. Teilweise gibt es auch einen Mediator-Gegenstand, wie beispielsweise ein Buch, in dem Marker mit neuen Inhalten verknüpft werden oder sogar selbst eine Menüfunktion in Kombination mit einem weiteren Marker ausüben (beispielsweise Löschen, Kopieren oder Hilfe) [123]. Auch virtuelle Knöpfe können so an einem der Logik der Anwendung folgenden Platz positioniert werden [24]. In Kombination mit Handgesten werden Menüs auch weltstabil (beispielsweise frei vor dem Anwender schwebend) angezeigt; ein Element kann dann durch eine entsprechende Handbewegung selektiert werden [51].

Besitzen die Menüs jedoch, was meist der Fall ist, einen übergeordneten Bezug auf das System, so werden sie meist kopfstabil angezeigt (wie in [132]). An welcher Position im Anzeigebereich das Menü letztlich angezeigt wird, wird unterschiedlich gelöst. Verwendet werden beispielsweise der obere [42] oder untere [122] Rand des Anzeigebereichs, so dass Zentrum des Blickfelds nicht durch virtuelle Inhalte verdeckt wird.

In einer Studie von Lee et al. wurden kopfstabile und objektreferenzierte Menüs miteinander verglichen [89]. Zugunsten der kopfstabilen Menüs wurde dabei festgestellt, dass sie sich immer im Blick befinden und es eine klare Trennung zwischen dem Menü und sonstigen (AR-)Inhalten gibt. Auf der anderen Seite sei das Menü durch die feste Anzeigefläche der Datenbrille jedoch in seiner maximal möglichen Größe sehr beschränkt. Objektreferenzierte Menüs haben den Vorteil, dass sich das Menü an seinem logisch korrekten Platz befindet. Allerdings müssen die entsprechenden Gegenstände vom System erkannt, deren Position bestimmt werden und sich während der Interaktion immer im Anzeigebereich der Datenbrille befinden.

Einen ähnlichen Vergleich führten auch White et al. durch [172]. Sie stellen fest, dass kopf- und objektstabile Menüs schneller als weltstabile Menüs bedient werden können. Die Bedienung kopfstabiler Menüs ist zudem genauer und erhält die besten subjektiven Bewertungen. Allerdings merken White et al. auch an, dass ein Vorteil objektreferenzierter Menüs sein könne, dass man sie aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten kann. Auch Ens et al. vergleichen in dem von ihnen entwickelten interaktiven System alle möglichen Referenzierungsvarianten für die Menüinteraktion [41]. In diesem Vergleich setzten sich weltstabile Menüs durch, da es bei den übrigen Stabilisierungsvarianten bei der Interaktion mittels direkter Handgesten zu ungewollten Selektionen virtueller Inhalte kam.

Letztlich muss die Stabilisierung von Menüs wohl für jeden Anwendungsfall von neuem betrachtet werden. Für die Verwendung in einem Fahrzeug könnten ohnehin die speziellen Rahmenbedingungen (Ablenkung, Sichtverdeckung) für eine andere Bewertung der Menüanzeige sorgen. Theoretisch kommen hier sowohl der Fahrer selbst, als auch Objekte im Innenraum des Fahrzeugs als Referenzkoordinatensystem für die Positionierung von Menüs in Frage.

## 2.4 Anwendungsbereiche von Datenbrillen

### 2.4.1 Verwendung von Head-Mounted Displays in der Industrie und Luftfahrt

Das erste funktionsfähige HMD wurde bereits Mitte der 1960er Jahre von Ivan Sutherland entwickelt [158, 159]. Die hierzu notwendige Technik war allerdings noch vergleichsweise sperrig und teuer und es war schwer vorstellbar, wie ein solches System tatsächlich in der Praxis eingesetzt werden sollte. Die ersten Experimente mit einem Konzept, welches heute in den Bereich der *Augmented Reality* eingeordnet werden würde, wurden 1992 von Rosenberg et al. veröffentlicht [140]. Hier wurden Probanden bei einer Telemanipulationsaufgabe durch haptische oder auditive Überlagerungen, sogenannter *Virtual Fixtures*, unterstützt. Den eigentlichen Begriff *Augmented Reality* führten Caudell et al. ein, als sie mit einem auf einer Datenbrille basierenden System erste Experimente zur Unterstützung von Fertigungsaufgaben beim Flugzeugbau machten [26]. Das Verlegen von Kabelsträngen, die Zuordnung der Kabelstränge zu passenden Steckverbindungen, die korrekte Fertigung eines aus mehreren Schichten bestehenden Materials und das Zusammensetzen komplexer Strukturen wurden hierbei mittels virtueller Überlagerungen unterstützt. Seit dem wurden in der Industrie zahlreiche Anwendungsfälle für den Einsatz von Datenbrillen untersucht (Überblick beispielsweise in [43]), wobei diese Anwendungen bis auf wenige Ausnahmen jedoch nie außerhalb einer Forschungseinrichtung eingesetzt wurden [43].

In Militärflugzeugen herrschte jedoch schon lange der Bedarf einer Anzeigemodalität, der sich im Unterschied zu einem fest verbauten HUD, ständig und unabhängig von den Kopfbewegungen des Piloten in dessen Blickfeld befindet [92]. In einem ersten Schritt wurde im Visier des Helmes des Flugzeugpiloten ein Fadenkreuz angezeigt; überlagerte der Pilot dieses mit einem Ziel konnte die Rotation des Helmes im Verhältnis zum Flugzeug bestimmt und so der Abschusswinkel einer Waffe automatisch berechnet werden [92]. Andere Anzeigen, beispielsweise ein virtueller Horizont mit zusätzlichen Informationen über die Flughöhe und -geschwindigkeit wurden hingegen noch in einem HUD angezeigt. Der Einsatz von HUDs hat allerdings drei grundsätzliche Nachteile: ihr Anzeigebereich ist an einer festen Position innerhalb der Windschutzscheibe verbaut, ihr Anzeigebereich ist konstruktionsbedingt relativ klein und die Integration eines HUD erfordert relativ viel Bauraum [2]. In modernen Kampfflugzeugen wird daher oft komplett auf ein HUD verzichtet und sämtliche Funktionen in einem HMD im Visier des Piloten angezeigt [70].

Aus diesem Grund beschäftigt sich die militärische Forschung schon seit einiger Zeit mit den Anforderungen an eine Datenbrille. So wurden beispielsweise bereits Empfehlungen bezüglich der besseren Gestaltung der grafischen Nutzungsschnittstellen formuliert (beispielsweise in [70]) und Richtlinienkataloge für die Entwicklung von Datenbrillen und den verwendeten Anzeigen veröffentlicht (beispielsweise [35]). Die Übertragung dieser Richtlinien auf den Fahrzeugkontext ist allerdings nicht unverändert möglich. So sind diese auf der einen Seite oft sehr allgemein gehalten und empfehlen beispielsweise den Tragekomfort zu maximieren, keine wichtigen Objekte zu verdecken, auf eine einheitliche Symbolverwendung zu achten oder die kognitive Belastung zu minimieren [35]. Auf der



anderen Seite sind konkrete Empfehlungen für die Entwicklung von Nutzungsschnittstellen stets auf eine bestimmte (militärische) Anwendung zugeschnitten und daher unter den vollkommen unterschiedlichen Rahmenbedingungen im Fahrzeug so nicht nutzbar.

## 2.4.2 Datenbrillen im Fahrzeug

Auch für den Einsatz im Fahrzeugkontext wurden Datenbrillen schon seit einigen Jahren in Betracht gezogen. Anfänglich war die Verwendung jedoch ausschließlich auf den Bereich der virtuellen Realität beschränkt. So wurden geschlossene Datenbrillen beispielsweise verwendet, um Angstgefühle beim Fahren nach einem schweren Unfall zu therapieren [170] oder um virtuelle Innenraumkonfigurationen in einem Fahrzeug betrachten und vergleichen zu können [143]. In dem Projekt *Vehicle in the Loop* wurde eine *optical see-through* Datenbrille verwendet, um neue Fahrassistenzsysteme gefahrlos evaluieren zu können [20, 81]. Dabei werden auf einer dem regulären Verkehr nicht zugänglichen Strecke einem Fahrer virtuelle Verkehrsteilnehmer angezeigt, um kritische Situationen gefahrlos und ohne Verlust der realen Fahreigenschaften und Beschleunigungskräfte nachstellen zu können.

Seit der Markteinführung der monokularen Datenbrille „Google Glass“ wurden einige Arbeiten veröffentlicht, die sich mit der Nutzung der neuen Technologie im Straßenverkehr beschäftigen. In allen Arbeiten wird dabei die Nutzung der Datenbrille mit der eines Smartphones verglichen. So wurde in einer Folgefahrt die Reaktionszeit auf ein unerwartetes Bremsereignis gemessen, während die Probanden entweder (über die Sprachsteuerung) mit Google Glass oder manuell mit dem Smartphone eine Sekundäraufgabe bearbeitet wurde [145]. Die Autoren finden entgegen ihrer Annahme keinen signifikanten Unterschied in der Reaktionszeit zwischen den beiden Bedingungen, messen allerdings in der Datenbrillen-Bedingung bessere Spurhaltewerte, eine geringere Arbeitslast (NASA TLX) und ein verbessertes Längsführungsverhalten.

In einer weiteren Studie wurde das Lesen und Schreiben von Kurznachrichten während der Fahrt auf einer Datenbrille (Sprachsteuerung), einem Smartphone mit Spracheingabe und einem Smartphone mit grafischer Tastatur verglichen [161]. Außerdem führten Probanden eine Vergleichsfahrt ohne jegliche Sekundärbeschäftigung durch. Die in der Studie gemessenen Lenkbewegungen waren bei der Bearbeitung der Nebenaufgabe mit dem Smartphone (mit Bildschirmtastatur) signifikant stärker als bei allen übrigen Bedingungen. Weiterhin wurden bei Benutzung des Smartphones mit Spracheingabe signifikant stärkere Lenkbewegungen durchgeführt als bei der Nutzung der Datenbrille beziehungsweise bei der Fahrt ohne Nebenaufgabe. Schließlich benötigten die Probanden bei der Nutzung der Touch-Tastatur signifikant länger für das Verfassen eines Texts als mit Spracheingabe. Die Autoren folgern aufgrund ihrer Ergebnisse, dass die Nutzung der Datenbrillentechnologie einen Mehrwert gegenüber der Nutzung des Smartphones bietet.

Beckers et al. verglichen die Eingabe eines Navigationsziels auf dem Google Glass, auf einem Smartphone mit Touch- und einem Smartphone mit Sprachinteraktion [15]. Die gemessene Auslastung war für die beiden per Sprache bedienten Geräte dabei signifikant geringer als mit dem Smartphone, welches über Touchinteraktion bedient wurde. Mit der

Datenbrille konnte das gewünschte Ziel signifikant schneller eingegeben werden, als mit den beiden anderen Modalitäten. Die Spurhaltung war mit der Datenbrille signifikant besser als in der Bedingung mit Touch-Interaktion. In einer Aufgabe, bei der die Reaktionsgeschwindigkeit auf Lichtreize im Sichtfeld (ähnlich PDT) gemessen wurde, reagierten Probanden erneut signifikant langsamer, wenn sie das Ziel auf einem Smartphone über Touch-Interaktion eingaben als in den beiden anderen Bedingungen. Die Zahl der nicht registrierten Reize war jedoch im Falle der Interaktion mit der Datenbrille signifikant höher als bei der Spracheingabe mit dem Smartphone. In beiden Bedingungen wurden allerdings signifikant weniger Reize verpasst als bei der Interaktion mittels Touch auf dem Smartphone. Beckers et al. folgern daher, dass die Ablenkung bei der Verwendung von Google Glass möglicherweise zwar geringer sei als bei der Touch-Interaktion mit einem Smartphone, allerdings trotzdem eine gewisse Ablenkungsgefahr impliziere.

Bei der Interpretation der beschriebenen Studien im Kontext dieser Arbeit sind drei Aspekte wichtig. Zum einen wird bei der Benutzung von Google Glass Sprache als Bedienmodalität vorgegeben, was einen Vergleich mit vielen Systemen unzulässig macht, beziehungsweise stark beeinflusst. Die speziell für die Benutzung von Google Glass entwickelte Menüinteraktion kann außerdem nicht ohne weiteres mit der Sprachinteraktion auf einem Smartphone verglichen werden. Weiterhin muss ein Benutzer für die Wahrnehmung von Inhalten auf Google Glass leicht schräg nach oben blicken. In dieser Arbeit werden ausschließlich Datenbrillen verwendet, die die Informationsanzeige unmittelbar vor oder nahe der Fahrszene erlauben. Zuletzt wird die Bedienung von Google Glass immer mit der im Straßenverkehr meist unzulässigen Bedienung von Smartphones verglichen. Ein Vergleich mit existierenden Systemen, beispielsweise einem HUD, bei gleichbleibender Bedienung ist für eine Beurteilung der Verkehrstauglichkeit der Datenbrille wohl zielführender.

## 2.5 Fokus dieser Arbeit

### 2.5.1 Anzeige

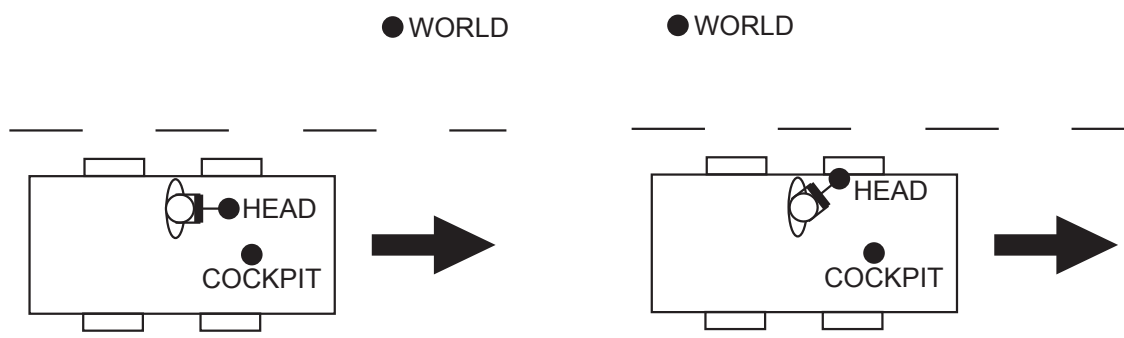
**Technische Plattform** Bei der Evaluation der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepte werden ausschließlich Datenbrillen mit *optical-see through* Technologie genutzt. Da keines der erarbeiteten Konzepte auf eine räumliche Darstellung angewiesen war, wurde außerdem auf eine stereoskopische Anzeige verzichtet und bis auf eine Ausnahme (monokulare Datenbrille) die bi-okulare Datenbrillenarchitektur verwendet. So konnte der Einfluss möglicher wahrnehmungsspezifischer Probleme, die durch das Tragen monokularer Datenbrillen auftreten können, auf die gewonnenen Daten reduziert und gleichzeitig die komplette horizontale Auflösung der Anzeige genutzt werden.

**Referenzkoordinatensystem** Koordinatensysteme, die bei der Verwendung von Datenbrillen in anderen Domänen noch von großer Bedeutung sind, spielen bei der Referenzierung von Information im Fahrzeug eine untergeordnete Rolle, während hingegen andere Bezugssysteme an Relevanz gewinnen. Dadurch dass sich der Fahrer innerhalb eines beweglichen Objekts befindet, ist das wichtigste neue Bezugssystem das Fahrzeug selbst. Da-

gegen befindet sich der Körper des Fahrers innerhalb des Fahrzeugs immer an der gleichen Position, wodurch dieser als Bezugssystem an Relevanz verliert.

Eine vergleichbare Situation herrscht in Flugzeugen vor, Dudfield et al. unterscheiden in dieser Domäne gar zwischen vier verschiedenen Referenzsystemen. Neben kopf- und flugzeugreferenzierten Inhalten unterscheiden sie weiter zwischen raum- (*space*) und boden- (*ground*) referenzierten Anzeigen [35]. Etabliert hat sich hier jedoch zumindest die Unterscheidung zwischen kopf-, flugzeug- und weltreferenzierter Darstellung (siehe beispielsweise [58, 180]).

Da sich die Situation des Flugzeugpiloten zumindest während der Fahrt bis zu einem gewissen Grade auf den Fahrer eines Fahrzeugs übertragen lässt, wird in dieser Arbeit die von Wickens et al. vorgeschlagene Unterscheidung zwischen kopf-, fahrzeug- und weltstabilen Inhalten [176] gewählt. Würde der Fahrer das Fahrzeug verlassen, so würde der Körper als Referenzsystem wieder an Bedeutung gewinnen, während das Fahrzeug für die Stabilisierung von Anzeigen wieder etwas an Relevanz verliert. In dieser Arbeit werden jedoch ausschließlich Anwendungsfälle für den Einsatz während der Fahrt betrachtet. Abbildung 2.9 zeigt anhand zweier Momentaufnahmen das Verhältnis der unterschiedlichen Referenzsysteme im Fahrzeug zueinander.



**Abbildung 2.9:** Referenzsysteme in einem Fahrzeug zu zwei Zeitpunkten  $t_1$  (links) und  $t_2$  (rechts). Abbildung modifiziert für den Automobilkontext nach [131].

Wenn Inhalte in anderen Koordinatensystemen als dem des Kopfes stabilisiert werden, ist die Positionserfassung eine der größten Herausforderungen (siehe Kapitel 2.3.3) bei der Entwicklung von Datenbrillen-Anzeigen. Dieses Problem wird im Fahrzeug zusätzlich verschärft. Bei der objektreferenzierten Anzeige von Inhalten in der Umgebung des Fahrzeugs existieren unter Umständen drei, sich unabhängig voneinander bewegende, Koordinatensysteme (der Kopf des Fahrers, das Fahrzeug und das entsprechende Objekt). Deren Position zueinander lässt sich nur durch zwei kooperierende Tracking-Systeme im Fahrzeug bestimmen, deren jeweiligen Ungenauigkeiten sich im schlechtesten Falle addieren. Die maximale Gesamtlatenz des gesamten Systems lässt sich über die Genauigkeitsanforderung im jeweiligen Anwendungsfall bestimmen. Soll beispielsweise bei einer ACC-Fahrt ein 40 Meter entferntes Vorderfahrzeug mit einer maximalen Abweichung von einem Meter markiert werden, so würde dies bei langsamen Kopfbewegungen ( $10^\circ$  pro Sekunde) bereits zu einer maximalen Gesamtlatenz von 140 ms, für schnellere Kopfbewegungen ( $100^\circ$  pro Sekunde) sogar zu einer maximalen Gesamtlatenz von 14 ms führen (Werte für langsa-

me/schnellere Kopfbewegungen stammen aus [12]). Tatsächlich gibt es Forderungen, dass für die Darstellung von objektreferenzierten Inhalten eine Gesamtlatenz von 16 ms nicht überschritten werden sollte [72]. Die oben durchgeführte Beispielrechnung ist dabei noch optimistisch, da lediglich die Kopfbewegungen betrachtet werden. Tatsächlich bewegt sich jedoch in der Realität nicht nur der Kopf des Fahrers, sondern im ungünstigsten Falle auch das Fahrzeug in Relation zum Objekt sowie das Objekt in Relation zum Fahrzeug.

Da mit aktuellen Tracking-Systemen allein für die Positionserfassung des Kopfes im Verhältnis zum Fahrzeug eine Gesamtlatenz von etwa 100 ms erreicht wird, sind für diese Anwendungsfälle weitere Fortschritte im Bereich der Tracking-Technologie notwendig. In der vorliegenden Arbeit werden aus diesem Grund lediglich die Referenzsysteme Kopf und Fahrzeug betrachtet. Mit dem Head-Up Display ist im Fahrzeug bereits eine fahrzeugstabile, die Fahrszene überlagernde Anzeige verfügbar. Besonders interessant wird der Vergleich mit kopfstabilen Inhalten und die Vor- und Nachteile beider Stabilisierungsformen. Im Kontext der Luftfahrt wird beispielsweise für bestimmte Anwendungsfälle davon ausgegangen, dass ein Vorteil kopfstabiler Information darin liegt, dass die Information immer und unabhängig von der Kopfdrehung sichtbar und zugänglich ist [176].

**Art der Inhalte** Für die fahrzeug- und kopfstabile Anzeige von Information im Fahrzeug eignen sich zunächst alle Inhalte, die den Fahrer bei der Ausübung der Fahraufgabe direkt unterstützen, also beispielsweise die Anzeige der aktuellen Geschwindigkeit, Navigationshinweise oder Statusinformationen über den Zustand von Fahrassistenzsystemen. Insbesondere bei der Untersuchung verschiedener Bedienmodalitäten und Interaktionskonzepte bieten sich hier zusätzlich spezielle Anwendungen aus dem Bereich der IVIS an.

## 2.5.2 Interaktion

Grundsätzlich erscheint es sinnvoll für die Interaktion mit Inhalten in der Datenbrille während der Fahrt die Fahrzeuginfrastruktur zu nutzen (siehe Kapitel 2.3.4). Bei der vielfach in Betracht gezogenen Interaktion über Sprache sind allerdings keine Besonderheiten durch die Verwendung der Datenbrille zu erwarten. Vielmehr hängt die Qualität einer Sprachbedienung sehr von der gewählten Dialogführung sowie von der Spracherkennung selbst ab. Naheliegend ist jedoch auch die Benutzung von im Fahrzeug integrierter Bedienelemente, da diese bereits umfassend untersucht sind und erfolgreich für die Bedienung anderer im Fahrzeug verbauter Bildschirme verwendet werden.

In dieser Arbeit werden Konzeptvorschläge gemacht, anhand derer die indirekte Interaktion mittels der Bedienmodalitäten Blick, Zeigegestik, Touch, Drehdrücksteller und Multifunktionslenkrad umgesetzt wird. Der Ort der Interaktion befindet sich demnach entweder vor der Mittelkonsole, am Lenkrad oder an der Datenbrille selbst (Blick). Je nach Interaktionsmodalität und Anwendungsfall werden dabei entweder eine, zwei oder gar drei Freiheitsgrade ausgenutzt. Die Bedienung von Infotainment-Funktionen während der Fahrt zieht in jedem Fall einen gewissen Grad an Aufmerksamkeit auf sich. Für die Evaluation der Systeme werden in dieser Arbeit daher Fahrsituationen verwendet, die nicht sämtliche verfügbaren kognitiven und sensorischen Ressourcen des Fahrers in Anspruch nehmen. Oft ist dies eine Folgefahrt auf der Autobahn, wie sie auch von der NHTSA empfohlen wird. In

einem Versuch wird zudem ein Szenario verwendet, in dem der Fahrer durch die Verwendung fortschrittlicher Fahrassistenzsysteme von der Ausübung der Fahraufgabe zumindest teilweise entbunden ist.



# Kapitel 3

---

## Konzeption, Entwicklung und Evaluation der Konzepte

Der Bau von Prototypen und deren Evaluation sind entscheidende Schritte bei der Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen [114]. Bei der Entwicklung von Anzeigen für die Datenbrille sind jedoch einige Besonderheiten zu beachten. Während der Durchführung der für diese Arbeit notwendigen Projekte wurden Werkzeuge erarbeitet, die den Entstehungsprozess eines Anzeige- und Bedienkonzepts für eine Datenbrille im Fahrzeug effektiv unterstützen. Im Folgenden werden Techniken vorgestellt, mit denen sowohl die frühe Konzeptphase als auch der Prototypenbau und die eigentliche Evaluation des resultierenden Konzepts bewältigt werden kann.

### 3.1 Konzeption und erster Prototyp

Kapitel 3.1 basiert auf der Publikation: F. Lauber, C. Böttcher und A. Butz. PapAR: Paper Prototyping for Augmented Reality. Erschienen in *Adjunct Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI)*, Seiten 1–6. ACM, 2014. [83]. Der Publikation liegt eine Idee zugrunde, die im Rahmen der Masterarbeit „Entwicklung und Evaluation eines Menüinteraktionskonzepts für Head-Mounted Displays im Fahrzeug“ von Claudius Böttcher entstand. Die Betreuung der Arbeit wurde von Felix Lauber geleistet. Die Prototyping-Technik wurde im Rahmen der Vorbereitungen eines Workshops von Felix Lauber und Claudius Böttcher entwickelt.

### 3.1.1 Motivation

Besonders in den frühen Konzeptphasen bietet es sich an eine Konzeptidee schnell mittels einer Zeichnung auf Papier zu realisieren (*Paper Prototyping*). So können erste Ideen früh und effektiv kommuniziert und verschiedene Konzeptvarianten in einer Gruppe diskutiert werden [13]. Paper Prototyping ist dabei sehr ressourceneffektiv. Naturgemäß werden einige der diskutierten Konzeptvorschläge bis zur Erstellung des finalen Prototypenbau wieder verworfen; bei der Verwendung von Paper Prototyping werden einige der geld- und zeitintensiven Umsetzungsphasen jedoch gar nicht benötigt. Als konkrete Vorteile der Verwendung von Papierprototypen werden besonders die Möglichkeiten angesehen sehr frühe Nutzerrückmeldungen über ein Konzept zu erhalten, verschiedene Konzepte und Ideen über einen gewissen Zeitraum parallel weiterzuverfolgen und eine generelle Ermutigung der Teammitglieder zu mehr Kreativität und Kommunikation [151].

Mit dem Einzug neuer Paradigmen für Benutzungsschnittstellen, wie etwa *Tangible User Interfaces* oder der stereoskopischen Darstellung von Inhalten, stoßen Konzeptentwickler mit traditionellem Paper Prototyping schnell an die Grenzen des Umsetzbaren. Nicht jede Technologie lässt sich auf Papier abbilden und wichtige Rahmenbedingungen, denen die Entwickler beim späteren Prototypenbau eventuell unterworfen sind, werden bei der Konzeptarbeit nicht beachtet. Daher wurden für einige dieser neuen Schnittstellen-Paradigmen bereits Techniken entwickelt, bei der das Prinzip des Paper Prototypings so modifiziert wurde, dass sie den neuen Anforderungen gerecht wird. Für die angesprochenen *Tangible User Interfaces* wurde dies beispielsweise mit dem Projekt *Paperbox* [177], für die Entwicklung stereoskopischer Interfaces mit den Systemen *Framebox* beziehungsweise *Mirrorbox* [23] gelöst.

Mensch-Maschine-Schnittstellen für Datenbrillen besitzen ebenfalls einige Charakteristika, durch deren Beachtung in frühen Entwicklungsphasen spätere Probleme vermieden werden können.

- **Koexistenz virtueller und realer Information:** Diese fundamentale Eigenschaft aller MR-Anwendungen sollte bereits bei der ersten Entwicklung eines Prototypen beachtet werden. Werden Objekte der realen Welt durch weltstabile Anzeigen überlagert, so ergibt sich deren Nutzen meist erst in Kombination mit den überlagerten Objekten. Dabei müssen beide Inhaltsarten im Prototypen zwar dargestellt, die virtuellen Anzeigen jedoch klar von den Elementen der realen Welt unterscheidbar gemacht werden. Allerdings können virtuelle Inhalte die reale Welt nicht nur anreichern, sondern auch verdecken und somit stören. Dies kann insbesondere bei der Darstellung kopfstabiler Inhalte problematisch werden, da sich diese immer im Blickfeld des Nutzers befinden und sich auch mit diesem mitbewegen.

Sowohl die Auswirkungen erwünschter Überlagerung realer Objekte mit virtuellen Inhalten als auch die unerwünschte Verdeckung von Teilen der Umgebung sollten idealerweise in einem frühen (Papier-) Prototypen bereits abbildbar sein. So können eventuelle Konzeptprobleme schnell erkannt und Nutzerrückmeldungen früh berücksichtigt werden.



- **Die Wahl des Referenzsystems:** Für jede darzustellende Information muss sich der Konzeptentwickler entscheiden, ob diese im Referenzsystem der Umgebung, des Displays (beziehungsweise Kopfes) oder auch eines speziellen Objekts positioniert werden. Diese Entscheidung kann große Auswirkungen auf das Konzeptverständnis haben und sollte daher auch bereits in frühen Entwicklungsphasen getroffen und verständlich kommuniziert werden können.
- **Technische Einschränkungen:** Im Moment sind die meisten MR-Systeme noch gewissen technischen Einschränkungen unterworfen. Datenbrillen besitzen beispielsweise nur einen relativ kleinen Anzeigebereich. Daher sind gerade objektstabile Inhalte bei Kopfdrehungen relativ schnell nicht mehr sichtbar, obwohl sich das überlagerte Objekt eigentlich noch im Sichtfeld des Nutzers befindet. Auch hier ist es wünschenswert, diese Einschränkung bereits bei der Konzeptentwicklung berücksichtigen zu können.

Für alle Stabilisierungsarten, ausgenommen kopfstabile Inhalte, muss für eine aufwändige Tracking-Infrastruktur gesorgt werden, da sowohl die Position des Anzeigegeräts (beispielsweise der Datenbrille) als auch die aller relevanten Objekte stets in Echtzeit verfügbar sein müssen. Dies macht Software-Prototyping sehr teuer, zeitaufwändig und komplex. Gerade Datenbrillen haben noch einen weiteren Nachteil für die Konzeptentwicklung in einem Team: die Datenbrille kann nur von einer Person gleichzeitig getragen werden, weswegen die entwickelten Inhalte folglich auch nicht von allen Teammitgliedern gleichzeitig auf der Zielplattform betrachtet werden können.

Im Folgenden wird daher eine Prototyping-Technik für frühe Konzeptentwicklungsphasen vorgestellt, die fast so einfach zu handhaben ist, wie herkömmliches Papier-Prototyping. Gleichzeitig ist der Entwickler jedoch in der Lage die genannten Herausforderungen von MR-Systemen zu bewältigen.

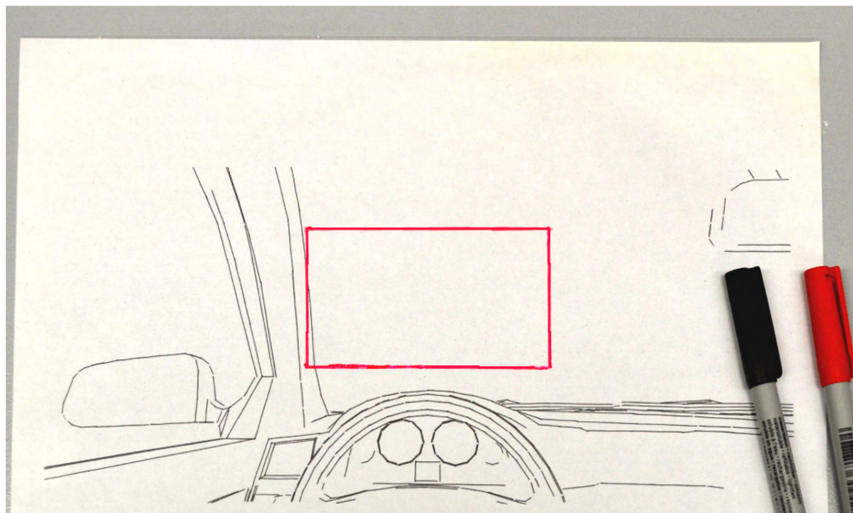
### 3.1.2 Prinzip

Die Prototyping Technik *PapAR* basiert auf folgendem Konzept: Anstatt nur auf ein Blatt Papier zu zeichnen, werden zwei Lagen aus unterschiedlichem Material verwendet. Die untere Lage besteht aus Papier; auf sie wird die Hintergrundszene gedruckt, vor der das zu entwickelnde Konzept später auch eingesetzt werden soll. Darüber wird eine Lage aus transparenter Folie gelegt; auf ihr wird zunächst maßstabsgetreu der Anzeigebereich der später zum Einsatz kommenden Datenbrille eingezeichnet. Die genaue Funktionsweise der Prototyping-Technik wird nun am Beispiel einer konkreten Anwendung weiter erläutert.

**Beispielanwendung** Der Fahrer eines Fahrzeugs soll Teile des Infotainment-Systems über die Datenbrille bedienen können. Sowohl die Anzeige als auch die Bedienung der ausgewählten Funktionen soll dabei während der Fahrt vorgenommen werden und somit möglichst wenig von der Fahraufgabe ablenken.

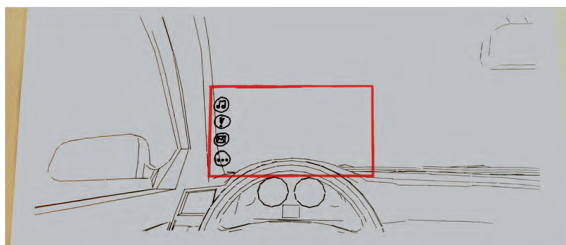
In einem ersten Schritt wird der Innenraum des Fahrzeugs aus Fahrerperspektive maßstabsgetreu auf Papier gedruckt (siehe Abbildung 3.1). Der Bildausschnitt wird dabei so gewählt,

dass er der natürlichen Perspektive des Fahrers während der Fahrt möglichst ähnlich ist. Auf die zweite Schicht aus Folie wird nun durch ein rotes Rechteck der Anzeigebereich der später verwendeten Datenbrille (LUMUS DK-32) eingezeichnet. Die Größenverhältnisse zwischen dem Ausschnitt der realen Szene (Fahrerperspektive) und dem Anzeigebereich der Datenbrille entsprechen dabei den realen Verhältnissen im Fahrzeug.

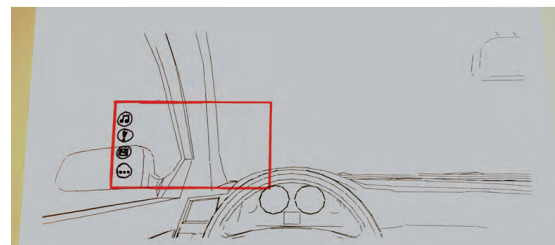


**Abbildung 3.1:** Die Hintergrundszene wird aus der Fahrerperspektive maßstabsgetreu auf Papier gedruckt. Auf einer darübergelegten Folie wird der Anzeigebereich der später verwendeten Datenbrille eingezeichnet (rotes Rechteck). Abbildung veröffentlicht in [83].

Bezüglich des Referenzsystems für die virtuellen Inhalte werden in diesem Fall kopfstabile und fahrzeugstabile Anzeigen in Betracht gezogen. Bei der Anzeige von kopfstabilen Inhalten befinden sich diese zunächst ständig im Blickfeld des Benutzers, auch wenn dieser seinen Kopf dreht. Bei der Verwendung von *PapAR* werden diese Inhalte auf die Folie gezeichnet. Dabei wird für die Darstellung der Inhalte lediglich der Bereich innerhalb des Rechtecks, welches den Anzeigebereich der Datenbrille kennzeichnet, verwendet (siehe Abbildung 3.2).



a) Der Fahrer blickt geradeaus



b) Der Fahrer dreht den Kopf nach links

**Abbildung 3.2:** Kopfstabile Inhalte werden direkt auf die Folie gezeichnet. Bei einem Verschieben der Folie (entspricht Kopfdrehung) bleiben diese im Blickfeld. Abbildung veröffentlicht in [83].

Um eine Kopfdrehung des Fahrers zu simulieren, kann nun die obere Folie gegenüber der unteren Schicht aus Papier verschoben werden. So können erste Probleme bezüglich mög-

licher Verdeckungen identifiziert und die Darstellung der Inhalte gegebenenfalls angepasst werden.

Alternativ können jedoch auch fahrzeugstabile Inhalte in Betracht gezogen werden. Bei der Verwendung von *PapAR* werden diese im Gegensatz zu kopfstabilen Inhalten direkt auf das Blatt Papier gezeichnet, welches auch das reale Szenario darstellt (siehe Abbildung 3.3). Abermals können nun durch Verschieben der Folie relativ zum darunterliegenden Papier die Kopfdrehungen des Fahrers simuliert werden. Nun werden die Konsequenzen des kleinen Anzeigebereichs der Datenbrille deutlich. Werden die angezeigten Elemente beispielsweise vertikal entlang der A-Säule des Fahrzeugs angeordnet, so werden Verdeckungen wichtiger Elemente der Umgebung des Fahrers zwar vermieden. Allerdings muss der Fahrer oft seinen Kopf etwas zur Seite drehen, um die Elemente auch wirklich sehen zu können.



a) Der Fahrer blickt geradeaus

b) Der Fahrer dreht den Kopf nach links

**Abbildung 3.3:** Fahrzeugstabile Inhalte werden auf das Papier mit dem Hintergrund gezeichnet. Bei einem Verschieben der Folie (entspricht Kopfdrehung) bleiben diese an derselben Position in Relation zur Umgebung. Abbildung veröffentlicht in [83].

### 3.1.3 Diskussion

In diesem Abschnitt wurde eine Prototyping-Technik für die Anwendungsentwicklung für Datenbrillen vorgestellt. Das Verfahren ist nur unwesentlich komplexer als die Verwendung von Papier-Prototypen. Dennoch können die wichtigsten Eigenschaften von MR-Anwendungen bereits in einem frühen Stadium der Entwicklung berücksichtigt werden. Die Verwendung von *PapAR* erlaubt eine realistische Abbildung der verschiedenen Stabilisierungsarten. Dabei können Kopfdrehungen des Nutzers können bis zu einer gewissen Komplexität dargestellt werden. Durch die Verwendung unterschiedlicher gestalterischer Maßnahmen, wie zum Beispiel Farbe und Graustufen, kann eine effektive Abgrenzung von realen und virtuellen Elementen geschaffen werden. Gleichzeitig wird deren Koexistenz wirkungsvoll abgebildet, was zum Gesamtverständnis der Anwendung beiträgt. Technologische Einschränkungen der späteren Zielplattform können teilweise bereits in die Konzeptentwicklung mit einfließen (Anzeigebereich) ohne dass hierfür mit viel Aufwand ein funktionaler Prototyp programmiert werden muss. Außerdem kann die Stabilisierung in den verschiedenen Referenzsystemen bereits abgebildet werden, wobei zunächst auf den Aufbau einer aufwändigen Tracking-Infrastruktur verzichtet werden kann.

In dem hier besprochenen Szenario wird eine sehr statische Hintergrundszene verwendet. Die einzigen Bewegungen, die ein Fahrer während der Fahrt vollzieht, sind typischerweise leichte Kopfdrehungen. Hierfür eignet sich die *PapAR*-Technik sehr gut; würde die Dynamik der Szene allerdings zu groß werden, würde die Anzahl der verwendeten Hintergrundbilder drastisch zunehmen. Gerade für Inhalte, die nicht kopfstabil dargestellt werden und somit auf das Papier gezeichnet werden, ist dies eine Limitierung.

Zukünftige Weiterentwicklungen von *PapAR* könnten daher Alternativen zu der Verwendung computergenerierter, ausgedruckter Hintergrundszenen untersuchen. In einem ersten Schritt könnten beispielsweise auch Fotografien verwendet werden. Für eine maßstabsgerechte Anpassung des Anzeigebereichs müssten hierfür lediglich die Brennweite ( $f$ ), mit der das Bild aufgenommen wurde, sowie die Breite ( $\text{Größe}_{\text{Sensor}}$ ) des in der verwendeten Kamera verbauten Sensors bekannt sein. Dann kann das Blickfeld ( $\text{Field of View (FOV)}$ ) des resultierenden Bildes berechnet werden durch:

$$\text{FOV}_{\text{Bild}} = 2 \times \tan^{-1} \left( \frac{\text{Größe}_{\text{Sensor}}}{2f} \right).$$

Ein weiterer wichtiger Schritt ist die Bereitstellung eines einfach zu handhabenden Werkzeugkastens, mit dem der komplette Prozessablauf unterstützt wird. Insbesondere die Berechnung der Darstellungsgröße von Anzeigebereich und Hintergrundszene in Abhängigkeit der verwendeten Datenbrille könnte einfach unterstützt werden und würde die Verwendung von *PapAR* erheblich vereinfachen.

Nachdem bereits erste Erfahrungen über den Einsatz von *PapAR* in einem Konzeptworkshop gesammelt werden konnten, müssen die Vorteile dieser Technik noch formal in einer Nutzerstudie bestätigt werden.

Bei der Entwicklung von Prototypen für die Datenbrille können wichtige Systemeigenschaften nicht zufriedenstellend auf Papierprototypen abgebildet werden. Mit *PapAR* wird klassisches Paper Prototyping jedoch so erweitert, dass zumindest die für die Entwicklung in einem Fahrzeug entscheidenden Faktoren bereits in frühen Konzeptphasen berücksichtigt werden können.

## 3.2 Schnelle Prototypenentwicklung in virtuellen Cockpits

### 3.2.1 Motivation

Nachdem die erste Konzeptphase abgeschlossen ist, ist es notwendig ein tieferes Verständnis vom System zu erzielen, als dies mit einem Papierprototypen möglich ist. Besonders die Dynamik eines interaktiven Systems erfordert eine frühe Erlebbarkeit der Konzepte, um beispielsweise kleinere Vorstudien durchzuführen und eventuelle Verbesserungsiterationen am System vorzunehmen.

Bezüglich der *Anzeige von Information* ist es wichtig, die Inhalte tatsächlich auf der späteren Zielplattform anzuzeigen. Die Farbdarstellung auf der Datenbrille kann sich von der auf einem ausgereiften Bildschirm unterscheiden. Da die Anzeigen zudem halbtransparent die reale Welt überlagern, können zusätzliche Herausforderungen bezüglich einer optimalen Ablesbarkeit der Inhalte die Folge sein. Die Farbe Schwarz beispielsweise wird bei der Anzeige auf der Datenbrille vollkommen transparent, die Farbe Weiß hingegen führt zu maximaler Helligkeit. Die Granularität der verwendeten Symbole, Schriftarten und -Größen, die Liniendicke und das Verhältnis von Transparenz zu Licht und Farbe sind weitere Parameter, die die Qualität der Anzeige auf der Datenbrille in großem Maße beeinflussen können.

Aber auch bezüglich der *Interaktion mit Inhalten* ist es teilweise sinnvoll früh mit dem Bau von funktionsfähigen Prototypen zu beginnen. Für die iterative Verbesserung eines Interaktionskonzepts ist es wichtig komplette Interaktionszyklen durchlaufen zu können. Die Interaktion mittels verschiedener Eingabemodalitäten kann ebenfalls erst mit funktionsfähigen Prototypen abgebildet werden.

Bei der Entwicklung höherwertiger Prototypen stellen sich jedoch die gleichen Probleme, die im vorigen Kapitel bereits intensiv beschrieben wurden: Vorausgesetzt der Entwickler hat keinen ständigen physikalischen Zugang zu einem Fahrzeug beziehungsweise würde durch den ständigen Zugang in seiner Produktivität eingeschränkt werden, können die Folgen des Zusammenspiels zwischen virtuellen Inhalten und der realen Umgebung des späteren Einsatzszenarios lediglich erahnt werden. Insbesondere die Auswirkungen der Kopfdrehungen beim Führen eines Fahrzeugs in Kombination der grundlegenden Fahrzeuggeometrie (Spiegel, integrierte Displays, Position der A-Säulen, Sitzhöhe) haben hier einen großen Einfluss.

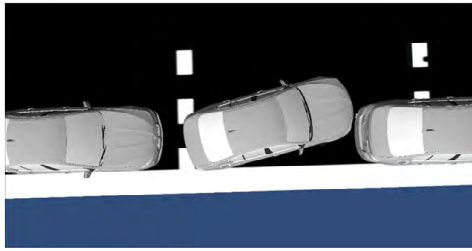
### 3.2.2 Prinzip

Um die angesprochenen Herausforderungen bei der Entwicklung höherwertiger Prototypen bewältigen zu können, wurde das die Entwicklungsumgebung und Engine *Unity 3D*<sup>9</sup> verwendet. Dabei wurde zunächst das Szenario, für welches das Datenbrillen-Konzept entwickelt werden sollte, nachgestellt. Die Entwicklungsumgebung von *Unity 3D* bietet hierzu die Möglichkeit 3D-Objekte, die in unterschiedlichen Formaten vorliegen können, auf eine Bühne zu importieren und mit entsprechenden Materialien, Texturen und Beleuchtungen auszustatten. Durch die Positionierung unterschiedlicher Kameras können verschiedene Perspektiven der Szene betrachtet werden (siehe Abbildung 3.4).

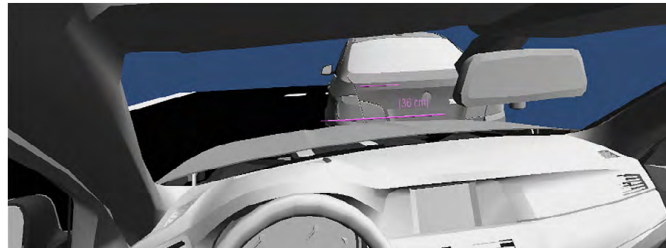
Die Parameter der Kameras können ebenfalls angepasst werden, so dass wahlweise der menschliche Blickwinkel nachempfunden werden kann (wie in Abbildung 3.4 b), oder der komplette Bildinhalt lediglich dem Anzeigebereich der Datenbrille entspricht (wie beispielsweise in Abbildung 3.5 b). Erstere Variante eignet sich dabei, um ein möglichst gutes Systemverständnis zu erlangen, während zweiteere Einstellungsmöglichkeit für den späteren Prototypen benutzt wird.

Komfortabel ist auch die Anbindung eines Kopftrackers. Wird eine Kamera an der Position im Fahrzeug positioniert, an der sich in der Realität auch der Kopf des Fahrers befände,

<sup>9</sup> <http://unity3d.com>



a) Nachbilden des Anwendungsszenarios (Einparksituation)



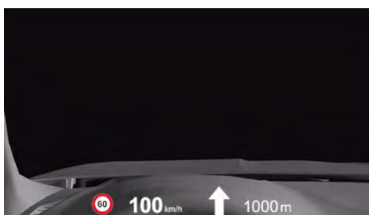
b) Anwendung aus Fahrerperspektive mit angebundenem Kopftracking

**Abbildung 3.4:** Nachstellung einer Parksituation in Unity 3D. Unterschiedlich positionierte Kameras bieten sowohl einen Überblick über die Szene als auch die Möglichkeit die Perspektive des Fahrers einzunehmen.

so ist die grundlegende Perspektive für den späteren Prototypen bereits geschaffen. Die Kamera muss nun lediglich in Echtzeit die Transformationen des Kopfes imitieren. Hierzu wird lediglich die der Fahrerperspektive entsprechende Kamera so bewegt, wie es die vom Tracker bereitgestellten Daten vorgeben.

Die Realisierung der verschiedenen Stabilisierungsvarianten ist nun abhängig davon, ob die angezeigten Inhalte im Szenegraphen der Kamera untergeordnet sind, oder ob diese in einem unabhängigen Teil des Szenegraphen organisiert sind. In ersterem Fall bewegen sich diese bei jeder Kamerabewegung in gleichem Maße mit, in zweiterem Fall sind die Inhalte von Transformationen der Kamera nicht betroffen.

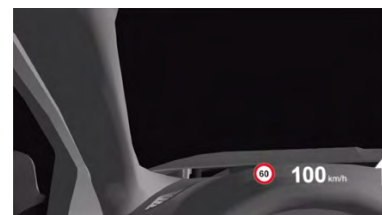
Das virtuelle Fahrzeug kann nun zur Konzeptentwicklung in der Szene verbleiben und so ein erster Eindruck des Zusammenspiels zwischen Anzeigen und Elementen des Fahrzeugs beziehungsweise der kompletten Szene für die verschiedenen Stabilisierungsvarianten vermittelt werden (siehe Abbildung 3.5).



a) Fahrer blickt geradeaus



b) Kopfstabile Anzeigen bei Kopfdrehung nach links



c) Fahrzeugstabile Anzeigen bei Kopfdrehung nach links

**Abbildung 3.5:** Bildausschnitt, der im Anzeigebereich der Brille sichtbar ist. Eventuelle Verdeckungs- oder Darstellungsprobleme der fahrzeug- und kopfstabiler Inhalte können so schnell identifiziert werden.

Für eine Verwendung in einer Sitzkiste oder in einem Realfahrzeug können dann das Fahrzeug sowie andere Szenario-relevante Elemente nach Bedarf aus der virtuellen Szene entfernt werden. Anstatt also einen oder mehrere Wegwerfprototypen zu produzieren, wird der ersten Konzeptveranschaulichung in mehreren Iterationen Funktionalität hinzugefügt bis der finale Prototyp fertiggestellt ist.

## 3.3 Evaluationsumgebungen

### 3.3.1 Studiendurchführung im Simulator

**Interne und externe Validität** Zur Bewertung neuer Technologien oder Interaktionskonzepte für den Fahrer eines Fahrzeugs sind Probandenstudien ein wichtiges Hilfsmittel. Diese können entweder in einem Fahrzeug während einer realen Fahrt durchgeführt werden oder in einer Simulationsumgebung. Für die Durchführung im Realfahrzeug spricht die hohe externe Validität der gewonnenen Daten. Im Gegensatz zu einer Simulatorfahrt, bei der oft sehr künstliche und vereinfachende Szenarios zum Einsatz kommen, sind die Probanden und die getesteten Systeme hier allen Einflüssen ausgesetzt, die sie auch bei der späteren Nutzung eines möglichen Serienproduktes erfahren würden. Andererseits kann gerade diese unkontrollierte Umgebung große Nachteile bei der Analyse der Daten haben: die Isolation einzelner Variablen ist für den Entwickler quasi unmöglich, da sich zwei Fahrten immer in einer Vielzahl von Kriterien unterscheiden. So ist es beispielsweise nicht möglich das Verhalten aller Verkehrsteilnehmer zu kontrollieren. So ist in einer erlebten Verkehrssituation nicht nur ein einziges Verhaltensmuster möglich und aus Sicht des Probanden auch valide.

Der Einsatz einer Simulationsumgebung hingegen erlaubt eine sorgfältige Entwicklung einzelner, reproduzierbarer Situationen, die im Optimalfall jeder Proband exakt in der gleichen Ausprägung erlebt. Sowohl das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer als auch die Komplexität der Situation (und somit die Bandbreite an Handlungsmöglichkeiten für den Probanden) kann hier kontrolliert werden und stets dem gleichen Schema folgen. Da die so gewonnenen Daten zwischen den Probanden nun sehr vergleichbar sind und sich im Optimalfall nur in den vom Versuchsentwickler intendierten Variablen unterscheiden, besitzen sie einen vergleichsweise hohen Grad an interner Validität. Inwieweit mit im Simulator gewonnenen Daten tatsächlich realistische Aussagen über das Nutzungsverhalten während einer realen Fahrt getroffen werden können, wurde in der Vergangenheit bereits untersucht.

Bach et al. verglichen hierzu Daten aus einer Simulatorfahrt mit denen aus einer möglichst identischen Fahrt im Realfahrzeug [11]. Dabei stellten sie sehr ähnliche Muster bezüglich des Blickverhaltens der Probanden und deren Leistungen in der Sekundäraufgabe fest. Die Leistungen in der Fahraufgabe jedoch, das Fahren mit möglichst geringen Abweichungen in Quer- und Längsführung, waren im Realfahrzeug generell besser als im Simulator. Die Autoren machen hierfür die fehlenden Beschleunigungskräfte des statischen Simulators und damit die geringere Rückmeldung über das Fahrverhalten für dieses Ergebnis verantwortlich. Dieses Ergebnis spricht jedoch nicht unbedingt gegen die Verwendung eines Simulators. Da auch in anderen Vergleichsstudien vergleichbare oder bessere Werte bei der Fahrt im Realfahrzeug festgestellt wurden, können die Daten aus der Simulatorfahrt als eine obere Grenze angesehen werden [18]. Wird einem System beispielsweise bei einer statischen Simulatorfahrt aufgrund der Fahrdaten ein verträgliches Ablenkungsmaß bescheinigt, so kann davon ausgegangen werden, dass dies für die Fahrt im Realfahrzeug umso mehr gilt. Da der Simulator weiterhin die Möglichkeit einer sehr exakten Messung und Protokollierung der Daten bietet, haben sie sich als Standard für die Evaluation dieser Systeme durchgesetzt und werden zu diesem Zweck auch von der AAM empfohlen [113].



### 3.3.2 Evaluationsumgebungen

Für die Evaluation der in den beiden nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Konzepte wurden verschiedene Simulationsaufbauten genutzt. Diese werden im Folgenden beschrieben und in den entsprechenden Studienbeschreibungen referenziert.

Die benutzte Simulationssoftware *SPIDER* [157] ist ein auf openDRIVE [36] basierendes Software-Framework zur Anpassung und Durchführung von Fahrsimulator-Szenarios. Während der Simulation findet eine präzise Protokollierung eines vorher festgelegten Datensatzes mit einer Rate von 50 Hz statt. Art und Umfang der protokollierten Daten sind dabei konfigurierbar: Neben dem Zustand des eigenen Fahrzeugs (beispielsweise Position, Geschwindigkeit, Lenkeinschlag und Druck auf die Pedalerie) und dem eines oder mehreren Fremdfahrzeuge (beispielsweise Geschwindigkeit und Abstand) können auch zusätzliche Werte mit aufgenommen werden, beispielsweise um einen bestimmten Wegabschnitt oder eine konkrete Verkehrssituation zu markieren.

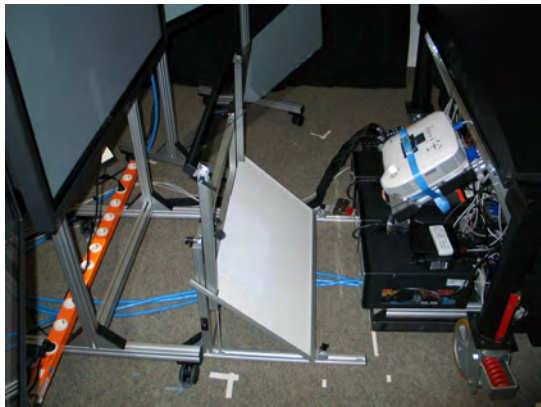
#### *Tischaufbau*

Der Simulationsaufbau niedrigster Wiedergabetreue nutzt keine Sitzkiste in der die Fahrzeugergonomie nachempfunden wurde und eignet sich daher nur für Studien in denen diese vermutlich keinen Einfluss auf die gewonnenen Daten hat. Probanden nehmen auf einem auf einem ausgebauten Autositz vor einem horizontal davor positionierten Büroschreibtisch Platz. Etwa zwei Meter vor dem Versuchsteilnehmer befindet sich ein 21:9 Widescreen-Bildschirm mit 127 cm Bilddiagonale, welcher die Fahrszene darstellt. Das Egofahrzeug wird mit einem Logitech MOMO Spielelenkrad mit entsprechender Pedalerie gesteuert. Dieser Tischaufbau kann optional mit einem HUD-Aufbau betrieben werden. In diesem Fall wird etwa 150 cm vor der Fahrer ein Teilerspiegel mit 70% Durchlässigkeit so angewinkelt, dass er den Inhalt eines auf dem Tisch liegenden Displays vor der Fahrszene in das Blickfeld des Probanden einspiegelt.

#### *Usability Lab*

In diesem Simulationsaufbau mittlerer Wiedergabetreue wird die Fahrszene auf drei nebeneinander positionierten Plasmabildschirmen mit jeweils 50 Zoll Bilddiagonale angezeigt. Der Proband nimmt mit einem Abstand von etwa zwei Metern davor in einer Sitzkiste Platz. Die horizontale Abdeckung der Simulation des Sichtfelds beträgt dabei nur etwa 90°, die vertikale nur etwa 10°. Hierdurch wird bereits die Umsetzbarkeit einiger Szenarios erschwert, beispielsweise kann bei Kreuzungen nicht mehr in die kreuzende Straße hineingesehen werden, oder eine Ampel kann nicht mehr dargestellt werden, wenn sich das Egofahrzeug zu nah davor befindet. Für die Verwendung einfacher Szenarios, wie beispielsweise eine Folgefahrt auf einer Autobahn, kann dieser Aufbau jedoch ein ausreichendes Maß an Realismus bieten. Die in diesem Aufbau verwendete Sitzkiste besitzt zwar lediglich eine (vordere) Sitzreihe, verfügt jedoch bereits über realistische Größenverhältnisse und Geometrien. Für das Fahrzeug-Interieur werden hauptsächlich Elemente aus BMW-Serienfahrzeugen verwendet, wodurch der Realitätsgrad für den Probanden zusätzlich erhöht wird. Die Konfiguration kann mit zwei unterschiedlichen HUD Aufbauten betrieben werden (siehe Abbildung 3.6).





a) HUD-Aufbau mit Projektor



b) HUD-Aufbau mit liegendem Display

**Abbildung 3.6:** Mögliche HUD Aufbauten im Usability Lab.

So kann einerseits die Spiegelung eines etwa 2,5 Meter vor dem Fahrer liegenden LCDs über einen entsprechend angewinkelten Teilerspiegel (70% Durchlässigkeit) in das Blickfeld des Fahrers eingebracht werden. In der alternativen Konfiguration werden die anzuzeigenden Inhalte mittels eines Projektors auf eine weiße Kunststoffplatte projiziert und das resultierende Bild dann über einen vergleichbaren Teilerspiegel wiederum halbtransparent vor der Fahrszene angezeigt. Der Abstand des virtuellen Bildes vom Kopf des Fahrers beträgt abhängig von der Sitzposition des Fahrers etwa 2,8 m.

### *Statischer Simulator mit Projektion*

In dem in dieser Arbeit ebenfalls verwendeten *Statischen Simulator* wird die Fahrszene unter Benutzung mehrerer Projektoren auf eine horizontal gekrümmte Leinwand projiziert. Die Sitzkiste wird so davor positioniert, dass sie in einer Entfernung von etwa 3 Metern  $220^\circ$  des horizontalen und  $45^\circ$  des vertikalen Sichtfelds abdeckt. Die horizontale Positionierung ist dabei asymmetrisch, so dass die Blickfeldabdeckung etwa  $120^\circ$  nach links und  $100^\circ$  nach rechts beträgt.

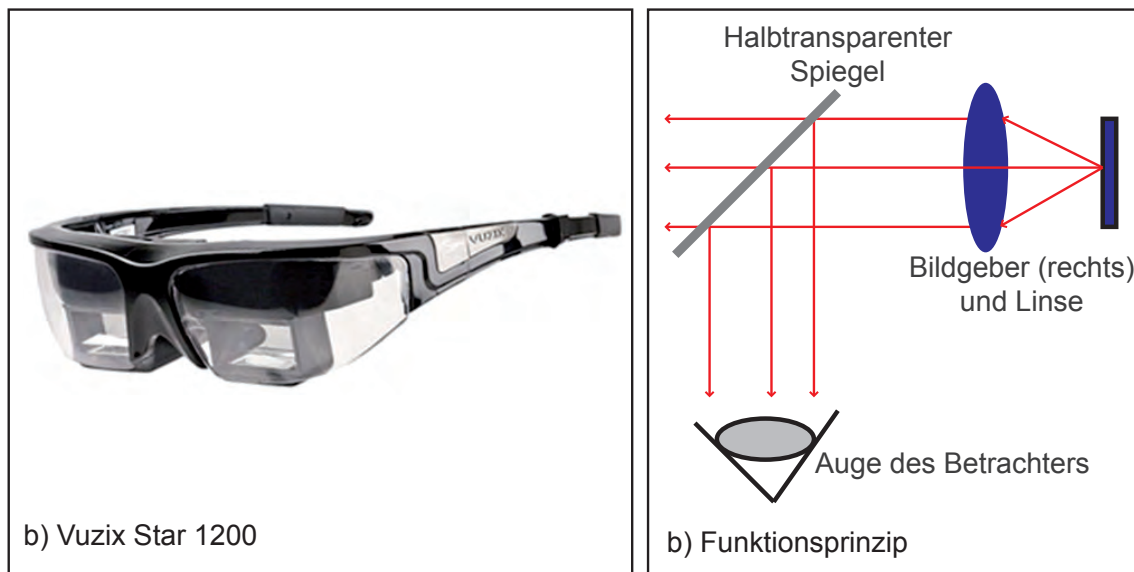
**Abbildung 3.7:** HUD-Aufbau mit auf dem Dach der Sitzkiste befestigten Bildschirm und Teilerspiegel im Statischen Simulator.

In dieser Simulatorumgebung kommt eine hinter den Fahrersitzen abgeschnittene BMW E60 (BMW 5er, Baujahr 2003 - 2010) Karosserie zum Einsatz. Das Head-Up Display kann dabei über einen in der Motorhaube liegenden Bildschirm und einen entsprechend positionierten Teilerspiegel realisiert werden. Das dabei entstehende Bild wird in einer Distanz von etwa 2,5 Metern zum Fahrer angezeigt. Alternativ kann auch ein Teilerspiegel das Bild eines auf dem Dach der Sitzkiste installierten Plasma-Bildschirms in das Blickfeld des Fahrers einbringen (siehe Abbildung 3.7). Das resultierende Bild wird dabei in einem Abstand von etwa 3 Metern vor dem Kopf des Fahrers angezeigt.

### 3.3.3 Head-Mounted Displays

#### *Vuzix Star 1200*

Die *Vuzix Star 1200* ist eine kommerziell erhältliche, bi-okulare Datenbrille, bei der zwei LCDs oberhalb des Durchsichtsbereiches für die Bilderzeugung zuständig sind [169]. Mit einem 45° geneigten Strahlenteiler, der 50% des Lichtes umlenkt, wird das Bild dann in das Auge des Trägers gespiegelt [78]. Das Prinzip wird in Abbildung 3.8 schematisch gezeigt.



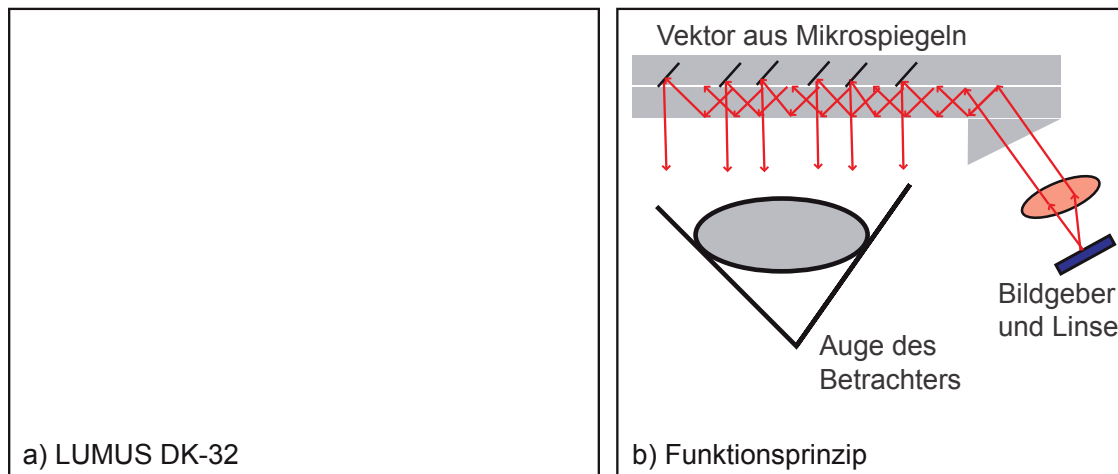
**Abbildung 3.8:** Links die genutzte Vuzix-Datenbrille [169], rechts schematisch deren Funktionsweise (Abbildung nach [78]).

Das erzeugte Bild erscheint in einer Distanz von etwa drei Metern und bedeckt etwa 15° des vertikalen und 27° des horizontalen Sichtfelds. Es wird mit einer Bildwiederholrate von 60 Hz dargestellt und besitzt eine Auflösung von 1280 Pixel horizontal und 720 Pixel vertikal [169].

#### *LUMUS DK-32*

Die *LUMUS DK-32* ist ebenfalls eine bi-okulare Datenbrille. Für die Bilderzeugung zwei sogenannte „micro display pods“ verwendet, eine Kombination aus einer Lichtquelle und

einem LCD. Im Unterschied zu dem Modell von Vuzix sind diese in den Rahmen der Brille eingearbeitet, das Bildes wird also seitlich in das Brillenglas eingespiegelt. Die Funktionsweise dieser Technik ist in Abbildung 3.9 illustriert.



**Abbildung 3.9:** Links die Lumus DK32-Datenbrille [94], rechts schematisch deren Funktionsweise (Abbildung nach [78]).

Nach dem Einbringen des Lichtes in das Brillenglas, verbleibt es zunächst innerhalb des Glases, da es von zwei gegenüberliegenden Schichten auf dem Glas immer hin und her reflektiert wird (Total Internal Reflection (TIR)). Innerhalb des Glases sind außerdem mehrere Extraktionselemente eingebracht. Diese sind genau so angeordnet, dass jedes dieser Elemente immer nur einen Ausschnitt des Bildes aus dem Glas herausreflektiert. Diese sequenziell extrahierten Bildausschnitte werden dann genau so auf das Auge des Trägers der Datenbrille gelenkt, dass für diesen wieder ein einziges Bild entsteht. Dieses Prinzip wird möglich, da sowohl die Extraktionselemente als auch die Beschichtung des Glases nur für einen bestimmten Einfallswinkel des Lichtes reflektierend wirken. Eine detaillierte Beschreibung des Prinzips findet sich in [108].

Als Resultat dieses wesentlich komplexeren Verfahrens können erheblich größere Bereiche des Sichtfelds abgedeckt werden, bei der *LUMUS DK-32* sind dies  $34,86^\circ$  horizontal und  $19,61^\circ$  vertikal. Das erzeugte Bild besitzt ebenfalls eine Projektionsdistanz von drei Metern und eine Auflösung von 1280 Pixel horizontal und 720 Pixel vertikal. Die Helligkeit der Brille kann auf  $255.4 \text{ cd/m}^2$  reduziert werden mit einem Kontrastverhältnis von 100:1.

Für die *LUMUS DK-32* sind geschliffene Korrekturgläser erhältlich, die mit einem Magneten so an der Innenseite der Brille befestigt werden können, dass Kurzsichtigkeit ausgeglichen werden kann.

### *LUMUS DK-31*

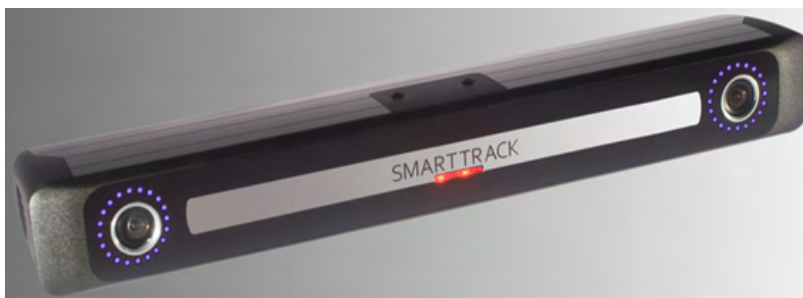
Das Prinzip der monokularen *LUMUS DK-32* ist identisch zu dem der *LUMUS DK-32*. Durch die reduzierte Bauweise, verringert sich allerdings die maximale Auflösung des dargestellten Bildes auf 640 Pixel horizontal und 360 Pixel vertikal. Der Anteil des Blickfelds, in dem Inhalte angezeigt werden können beträgt  $16,6^\circ$  horizontal und  $9,3^\circ$  vertikal. Wie

die *LUMUS DK-32* verfügt auch die *LUMUS DK-31* über einen Satz geschliffener Korrekturgläser, die bei Bedarf mit einem Magnetverschluss an der Brille angebracht werden können.

### 3.3.4 Tracker

Für die Erfassung der Position des Kopfes wurde das System *ART Smarttrack* verwendet, welches aus zwei Komponenten besteht. Die erste Komponente ist eine Vorrichtung mit zwei im Abstand von etwa 30 cm Abstand montierten Kameras, um die jeweils ein Kranz aus Infrarot-LEDs angeordnet ist. Diese Infrarot-LEDs (850 nm Wellenlänge) beleuchten die vor dem Tracker befindliche Szene, in der sich bis zu vier sogenannter *Targets* befinden können. In dieser Arbeit wurden ausschließlich passive Targets verwendet: dabei werden sechs retroreflexive Kugeln in einer bestimmten geometrischen Anordnung an eine Kunststoff-Vorrichtung montiert. Diese reflektieren, wenn sie von den Infrarot-LEDs angestrahlt werden, das Licht zu den beiden Kameras. Die zweite Komponente ist die Software *DTrack 2*. Diese analysiert in Kenntnis der geometrischen Struktur des Targets (beziehungsweise der reflektierenden Kugeln) beide Kamerabilder und ist so in der Lage dessen Position im Raum festzustellen und mit einer Frequenz von bis zu 60 Hz auszugeben. Die Kameras decken dabei einen Bereich von etwa 100° horizontal und 84° vertikal ab. Die resultierenden Daten können dann über das UDP-Protokoll von einem beliebigen Konsumenten genutzt werden. Eigene Messungen ergaben bei der Benutzung des Smarttrack-Systems eine Ende-zu-Ende-Verzögerung von 83 ms, bei der zusätzlichen Benutzung von Unity 3D eine Ende-zu-Ende-Verzögerung von etwa 100 ms.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Position des Kopfes (alle sechs Freiheitsgrade) mithilfe eines GT-5 Targets erfasst. Dieses wurde auf ein Kopfband montiert, so dass es zusammen mit der Brille bequem getragen werden kann (siehe Abbildung 3.10).



a) ART Smarttrack Infrarottracker



b) GT-5 Target mit Kopfband

**Abbildung 3.10:** Links das Smarttrack-System der Firma ART [5], rechts ein auf ein Kopfband montiertes GT-5 Target.

# Kapitel 4

---

## Informationsanzeige

In diesem Kapitel wird untersucht, welche Besonderheiten bei der Anzeige von Information auf einer Datenbrille während der Fahrt zu berücksichtigen sind. Eine wichtige Entscheidung hierbei ist die Wahl eines Referenzkoordinatensystems für die virtuellen Inhalte. Wie in Kapitel 2.5 bereits ausgeführt, kommen sowohl für fahrrelevante Anzeigen als auch für Infotainment-Systeme grundsätzlich die beiden Anzeigevarianten kopfstabil und fahrzeugstabil in Frage. Mit Head-Up Displays ist bereits eine relativ gut erforschte Technologie im Serieneinsatz, die die fahrzeugstabile Anzeige von Information über der Fahrszene ermöglicht. Auf der einen Seite ermöglicht es die Datenbrille diese Anzeige zu imitieren, ohne dabei eine technologische Beschränkung auf einen bestimmten Teil der Windschutzscheibe in Kauf nehmen zu müssen. Andererseits ist es mit einer Datenbrille nun erstmals möglich Anzeigen auch kopfstabil anzuzeigen. Diese Anzeigevariante impliziert, dass virtuelle Inhalte sich immer und unabhängig von der Blickrichtung des Fahrers in dessen Sichtfeld befinden. Dies ist eine Eigenschaft, die im Kontext von Militärflugzeugen bereits näher untersucht wurde, aber auch im Fahrzeug Konsequenzen mit sich bringt.

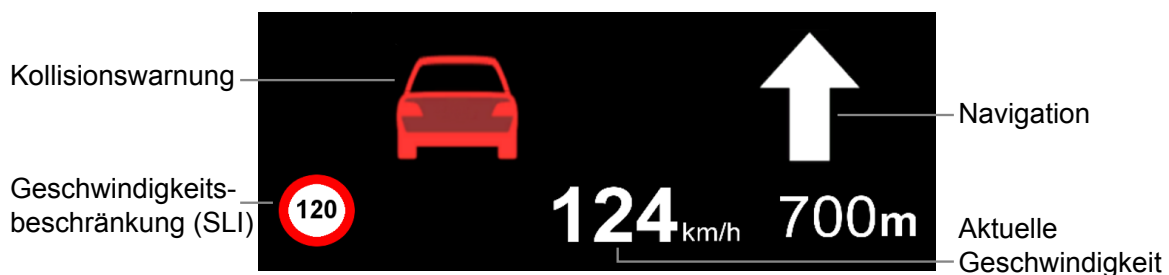
In den folgenden Studien wird daher untersucht, wie sich die fahrzeugstabile Informationsdarstellung in einer Datenbrille von der in einem Head-Up Display unterscheidet und welche Besonderheiten die erstmals ermöglichte kopfstabile Anzeige mit sich bringt. Außerdem wird ermittelt, an welcher Position innerhalb des Anzeigebereichs der Datenbrille die Inhalte angezeigt werden sollten und wie viel Information angezeigt werden kann ohne den Fahrer dabei zu stark von der Fahraufgabe abzulenken. Am Beispiel einer Auffahrwarnung wird gezeigt, wie mit kopfstabilen Anzeigen die Darstellung kritischer Informationen optimal unterstützt werden kann. Abschließend wird ein neuartiges Anzeigekonzept vorgestellt, mit dem die identifizierten Probleme von kopf- und fahrzeugstabilen Anzeigen umgangen werden können.

## 4.1 Fahrerunterstützende Anzeigen auf dem HMD: Vorteile und Herausforderungen

Kapitel 4.1 basiert auf der Publikation: F. Lauber und A. Butz. Are HMDs the better HUDs? Erschienen in *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Seiten 267–268. IEEE, 2013. [82]. Die Programmierung der für die Studie notwendigen Software wie auch die Konzeption, Durchführung und Auswertung der Studie selbst wurde jeweils von Felix Lauber durchgeführt.

### 4.1.1 Motivation und Untersuchungsgegenstand

Ziel des ersten Versuchs war es die grundsätzlichen Vor- und Nachteile der Stabilisierung von Inhalten in den beiden Koordinatensystemen *Kopf* und *Fahrzeug* zu untersuchen. Ein Head-Up Display diente dabei als Referenzvergleichssystem: Zum einen besitzen Head-Up Displays, genau wie Datenbrillen, die Eigenschaft, dass Inhalte halbtransparent und die Fahrszene überlagernd angezeigt werden. Zum anderen ist hier die Anzeige von fahrbegleitenden Informationen wie der aktuellen Geschwindigkeit, Navigationshinweisen und Geschwindigkeitsbeschränkungen bereits gut erforscht und die Vorteile im Vergleich zu anderen Anzeigeorten wie dem Kombi-Instrument sind hinreichend belegt (siehe auch Kapitel 2.2). Diese Inhalte wurden daher auch für die Anzeige in der Datenbrille beziehungsweise im Head-Up Display ausgewählt (Abbildung 4.1). Um den Vergleich der beiden



**Abbildung 4.1:** Anzeigeelemente in der ersten Studie.

Stabilisierungsformen quantifizieren zu können, wurden drei spezifische Fragestellungen untersucht. Zunächst wurde ein Peripheral Detection Task (siehe Kapitel 2.1.5) durchgeführt, um eventuelle Unterschiede zwischen den Anzeigeformen im Kontext des cognitive capture-Phänomens (wie in [184] vorgeschlagen) zu identifizieren. Bei kopfstabilen Anzeigen befinden sich die Inhalte immer und unabhängig von der Blickrichtung im Blickfeld des Fahrers und befinden sich mit den Kopfbewegungen des Fahrers auch immerfort relativ zur Hintergrundszene in Bewegung. Daher wurde hier erwartet, dass als Konsequenz davon kopfstabile Anzeigen auch ein höheres Maß an visueller Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Dies hätte eventuell eine verminderte Fähigkeit zur Folge Änderungen in der Peripherie wahrzunehmen.



Des Weiteren wurden zwei spezifische Fahrsituationen entwickelt, in denen die Probanden schnell auf eine Änderung der Anzeige in der Datenbrille beziehungsweise im Head-Up Display reagieren mussten (siehe Abbildung 4.2). In beiden Fällen wurde die Reaktionszeit des Fahrers gemessen um einen möglichen Einfluss der Stabilisierungsform zu identifizieren.



**Abbildung 4.2:** Verkehrsspezifische Situationen.

Zusätzlich füllten die Probanden mehrere Fragebögen aus, in denen sie ihre subjektiven Eindrücke zu den unterschiedlichen Darstellungsvarianten darlegen konnten.

Abschließend wurde in einem weiteren Fragebogen abgeprüft, ob durch das Fahren mit einer Datenbrille körperliche Beeinträchtigungen, wie Kopfschmerzen, Schwindel oder Beeinträchtigungen des Sehsinns hervorgerufen würden. Da von entsprechenden Komplikationen sowohl durch die Benutzung eines statischen Simulators [137] als auch durch die Verwendung einer Datenbrille [118] berichtet wurde, wurde erwartet, dass sich die Effekte verstärken würden, was die Benutzung von Datenbrillen in einer Fahrsimulation grundsätzlich erschweren würde.

### 4.1.2 Studie

**Aufbau** Die Studie fand in dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen, statischen Simulator statt. Als HUD diente dabei ein in der Motorhaube des Fahrzeugmodells liegender Bildschirm, dessen Inhalt über einen schräg darüber positionierten Teilerspiegel in das Sichtfeld des Fahrers reflektiert wurde. Alternativ wurde die in Kapitel 3.3.3 beschriebene Vuzix Star 1200 Datenbrille verwendet. Die Visualisierung wurde so angepasst, dass sie auf beiden Anzeigemodalitäten maximal (je nachdem welche Inhalte angezeigt wurden auch weniger)  $3,60^\circ$  vertikal und  $11,61^\circ$  horizontal des Blickfelds einnahm. Um die Position des Kopfes des Fahrers in allen sechs Freiheitsgraden zu bestimmen, wurde ein (ebenfalls in Kapitel 3.3.4 beschriebenes) ART Smarttrack System zentral auf dem Amaturenbrett des Versuchsträgers installiert.

**Szenario** Für die Studie wurde ein Szenario mit unterschiedlichen Fahrsituationen gewählt: Probanden starteten auf dem Standstreifen einer dreispurigen Autobahn, fuhren dann zunächst ca. 1,5 km bevor sie auf einen anderen, etwa 3,9 km langen, Autobahnabschnitt wechselten. Auf diesem Abschnitt erlebten die Probanden die erste versuchsspezifische Fahrsituation: eine Geschwindigkeitsbeschränkung wurde durch ein am Standstreifen parkendes Pannenfahrzeug verdeckt und war somit nur als virtuelle Anzeige verfügbar. Dabei

wurde die Zeit gemessen, die zwischen dem Erscheinen der Geschwindigkeitsbegrenzung auf der virtuellen Anzeige und der entsprechenden Reaktion des Fahrers (Bremsen beziehungsweise Druck am Gaspedal verringern). Nach dem Durchfahren des Autobahnabschnitts wurden weitere 2,4 km auf einer Landstraße gefahren (km 8 bis km 10,4), bevor die Probanden schließlich in einer fiktiven Großstadtumgebung weitere 2,6 km fuhren. Im letzten Teil des Szenarios wurden insgesamt ein Rechtsabbiegevorgang, drei Spurwechsel sowie zwei Linksabbiegevorgänge absolviert, um den Probanden Möglichkeit zu geben die Datenbrille auch in Fahrsituationen mit komplexerem visuellem Anspruch zu erleben. Außerdem fand hier die zweite versuchsspezifische Fahrsituation statt: vor einer grünen Ampel führte ein vorausfahrendes Fahrzeug ein plötzliches Bremsmanöver durch. Um eine Kollision zu verhindern, waren die Probanden gezwungen ihr eigenes Fahrzeug abzubremesen. Um den Fahrer entsprechend zu unterstützen, wurde eine visuelle Auffahrwarnung ausgelöst. Gemessen wurde hier die Zeit zwischen dem Erscheinen der Warnung auf dem HUD beziehungsweise der Datenbrille und dem Betätigen der Bremse durch den Probanden.

Der Peripheral Detection Task wurde in 3 Phasen durchgeführt. Eine Phase dauerte 60, 49 beziehungsweise 47 Sekunden an. Die Phasen waren so verteilt, dass jeweils ein Abschnitt auf der Autobahn (km 4,6), einer auf der Landstraße (km 8,4) und einer in der Stadt (km 10,9) bearbeitet wurde. Die abhängigen Variablen für den PDT waren die durchschnittliche Reaktionszeit auf die visuellen Reize, sowie die Anzahl der Reize, auf die nicht reagiert wurde. Der Beginn sowie das Ende jedes Abschnitts, in dem der PDT durchgeführt werden sollte, wurde durch ein akustisches Signal angekündigt.

**Stichprobe** An der Studie nahmen insgesamt 35 Versuchspersonen teil, davon waren 8 weiblich und 27 männlich. Alle Versuchspersonen waren BMW-Mitarbeiter und 25 hatten bereits mindestens einmal an einer Simulatorstudie teilgenommen. Die Teilnehmer waren zwischen 23 und 57 Jahren alt ( $M^{10}=32,8$ ,  $SD^{11}=8,9$ ) und hatten normale beziehungsweise korrigierte Sehkraft.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Die Studie wurde in einem Within-Subjects-Design (Intra-Subjekt-Design) entworfen, das heißt alle Probanden erlebten jede getestete Studienbedingung. Die Reihenfolge der Studienbedingungen wurde dabei balanciert, um eventuelle Gewöhnungseffekte zu vermeiden. Nach der Begrüßung nahmen die Probanden im Versuchsfahrzeug Platz und wurden in die Anzeigen und Aufgaben instruiert. Die Probanden wurden angeleitet den Navigationshinweisen auf der Datenbrille beziehungsweise dem Head-Up Display zu folgen. Außerdem wurden sie instruiert, wenn möglich, mit einer konstanten Geschwindigkeit von 140 km/h auf der mittleren Spur zu fahren und sich ansonsten an die Verkehrsregeln zu halten. Nach einer circa fünfminütigen Eingewöhnungsfahrt durchfuhren die Probanden das Szenario zwei Mal, wobei sie die virtuellen Inhalte in der einen Fahrt auf dem HUD angezeigt bekamen und in der anderen Fahrt auf der Datenbrille. Auf der Datenbrille wurden die Inhalte dabei kopfstabil dargestellt. Die Datenbrille wurde dabei in beiden Versuchsfahrten getragen, wurde jedoch in der Fahrt mit dem HUD ausgeschaltet. Nach jeder Fahrt wurden die Probanden gebeten einen kurzen Fragebogen auszufüllen.

---

<sup>10</sup> Mean (Mittelwert) (M)

<sup>11</sup> Standard Deviation (Standardabweichung) (SD)



Im ersten Fragenblock bewerteten die Probanden dabei auf einer 5-Stufigen Likert-Skala (von überhaupt nicht bis sehr stark), wie stark sie jeweils verschiedene Symptome der Simulator-Krankheit (Übelkeit, Kopfschmerzen, Schwindel) und Symptome, die speziell mit dem Tragen von Datenbrillen assoziiert werden (Augenschmerzen und das Sehen von Doppelbildern), empfinden. Ein weiterer Fragenblock, der mittels einer Einschätzung auf einer 7-stufigen Likert Skala (von „stimme überhaupt nicht zu“ bis „stimme vollkommen zu“) beantwortet wurde, zielte auf die Nützlichkeit der Anzeige ab. Probanden wurden gefragt, wie ablenkend, verwirrend, hilfreich und übersichtlich sie die Anzeigen einschätzen und wie gut die Inhalte abgelesen/wahrgenommen werden konnten. Außerdem wurden die Versuchspersonen gefragt, wie störend beziehungsweise unterstützend bei der Fahraufgabe die Anzeigen empfunden wurden und wie sehr sie trotz oder wegen der Anzeigen in der Lage waren das Geschehen auf der Fahrbahn im Blick zu behalten.

Nachdem die Probanden beide Messfahrten absolviert hatten, folgte der dritte Teil der Studie. In diesem Durchgang wurden die Anzeigen in der Datenbrille, dieses Mal jedoch fahrzeugstabil an der Position des Head-Up Displays, dargestellt. Die Probanden wurden gebeten, zunächst im Stand, dann während der Fahrt in einer verkürzten Form des Stadt-Szenarios, laut zu denken und ihre Eindrücke über die Gegensprechanlage zu schildern (think-aloud Technik).

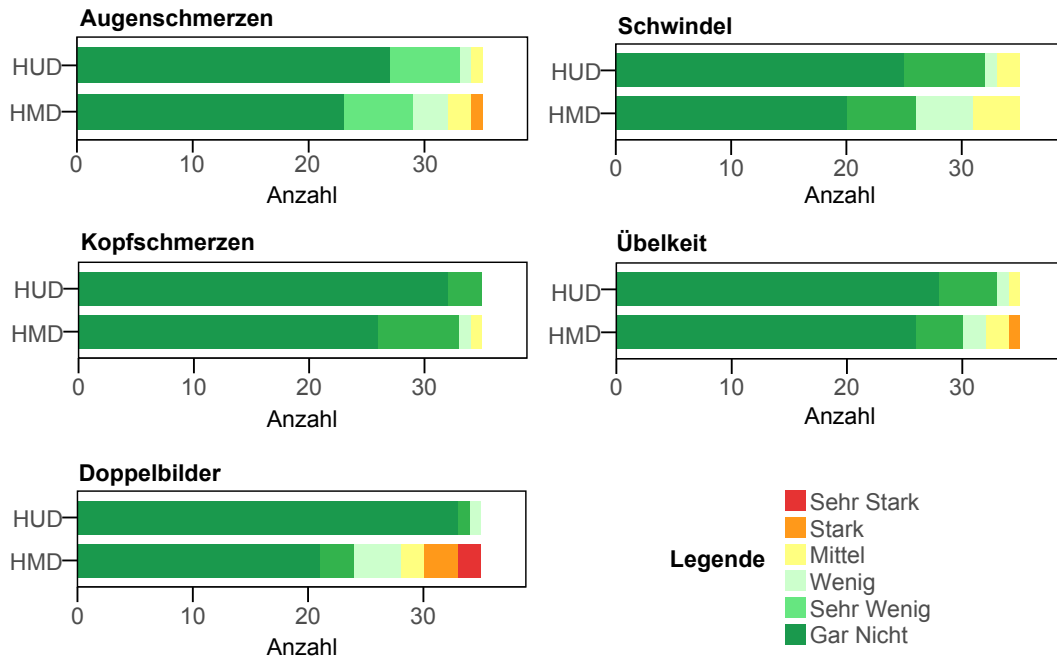
Abschließend füllten die Versuchspersonen einen dritten Fragebogen aus, in dem neben demographischen Daten der Vergleich der erlebten Anzeigetechniken im Mittelpunkt stand. Die Probanden wählten aus, welche Anzeigeform sie favorisieren und wurden aufgefordert ihre Wahl zu begründen.

**Ergebnisse** Betrachtet man die Ergebnisse der Fragebögen, so ist zunächst einmal festzustellen, dass das generelle Niveau **körperlicher Beschwerden** in beiden Anzeigetechnologien relativ niedrig ist. In allen abgefragten Kategorien, wurden von der Mehrheit der Probanden keinerlei Beschwerden empfunden (siehe Abbildung 4.3). Um die beiden Anzeigemodalitäten statistisch miteinander zu vergleichen, wurden paarweise Wilcoxon-Rangsummen Tests durchgeführt. Diese Vergleiche ergeben, dass das HMD in den Kategorien Augenschmerzen ( $Z=2,21$ ), Schwindel ( $Z=2,27$ ), Kopfschmerzen ( $Z=2,46$ ) und Doppelbilder ( $Z=3,20$ ) jeweils signifikant schlechter abschnitt als das HUD ( $p<0,05$ ). Lediglich der Vergleich bezüglich der Übelkeit der Probanden ergab keinen statistisch signifikanten Unterschied.

Die durchschnittliche Reaktionszeit auf die visuellen Reize im **Peripheral Detection Task** belief sich in dieser Studie auf 0,80s ( $SD=0,13s$ ) mit der Datenbrille beziehungsweise auf 0,77s ( $SD=0,11s$ ) mit dem Head-Up Display. Im Mittel wurde bei der Benutzung der Datenbrille auf 1,33 ( $SD=0,83$ ) Reize nicht reagiert, bei Verwendung des Head-Up Displays waren es 1,44 ( $SD=0,71$ ) Reize. Gepaarte t-Tests für verbundene Stichproben ergeben für keinen dieser Vergleiche einen signifikanten Unterschied.

Bei beiden **versuchsspezifischen Fahrsituationen** wurde lediglich die Reaktionszeit in der jeweils ersten Fahrt ausgewertet. In der zweiten Fahrt kennen die Probanden das Szenario bereits, antizipieren die Situation und verfälschen so die Reaktionszeiten.

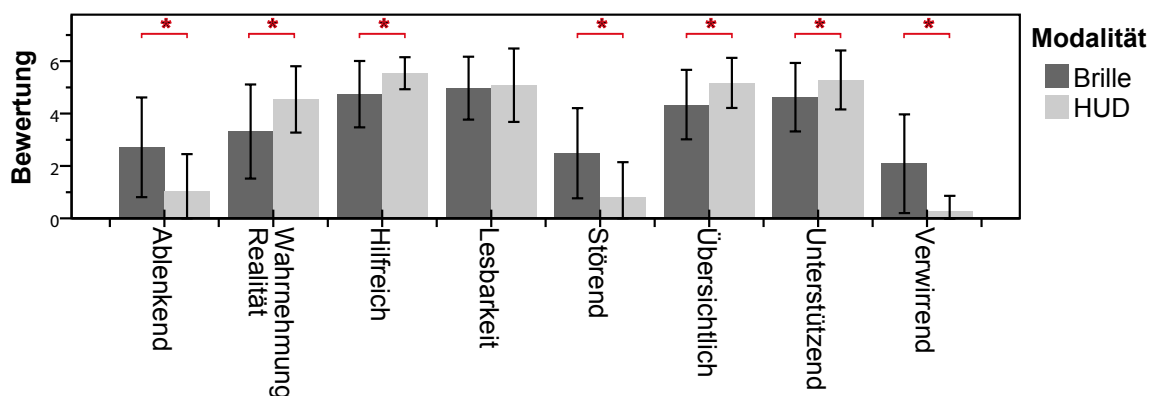
Auf die Geschwindigkeitsbeschränkung reagierten die Studienteilnehmer innerhalb von 1,20s ( $SD=0,54s$ ) wenn sie die Datenbrille benutzten und innerhalb von 1,66s ( $SD=0,95s$ ) wenn sie die Fahrt mit dem Head-Up Display absolvierten. Ein t-Test für unabhängige Stichproben zeigt, dass dieser Unterschied nicht signifikant ist.



**Abbildung 4.3:** Unterschiede zwischen den Anzeigemodalitäten bezüglich körperlicher Beeinträchtigungen

Auf die Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs reagierten die Probanden im Mittel innerhalb von 0,39s (SD=0,21s) wenn die Inhalte auf der Datenbrille angezeigt wurden und innerhalb von 0,47s (SD=0,36s) wenn das Head-Up Display als Ausgabemodalität vorgesehen war. Auch hier ist der Unterschied zwischen den Bedingungen nicht signifikant.

Bei der **subjektiven Beurteilung** der beiden Systemvarianten anhand der vorgegebenen Kriterien favorisierten die Probanden die Darstellung der Inhalte auf dem Head-Up Display gegenüber der Datenbrille (siehe Abbildung 4.4). Paarweise t-Tests für verbundene



**Abbildung 4.4:** Subjektive Einschätzung (Mittelwert) der Anzeigemodalitäten HUD und Datenbrille (HMD). Die mit einem \* gekennzeichneten Paare unterscheiden sich signifikant voneinander ( $\alpha = 0,05$ )

Stichproben zeigen, dass die Probanden die Anzeigen auf dem Head-Up Display denen auf

der Brille in fast allen Kategorien signifikant überlegen empfanden ( $\alpha = 0,05$ ). Lediglich bei der Frage, ob das jeweilige Anzeigemedium die gewünschten Informationen jederzeit ablesbar zur Verfügung stellte, unterscheiden sich die durchschnittlichen Antworten nicht signifikant.

Ähnlich hierzu äußerten sich die Probanden im Abschlussfragebogen: nur insgesamt 7 Probanden favorisierten ein Brillenkonzept. Davon empfand eine Versuchsperson die fahrzeugstabile Anzeige auf der Datenbrille als das insgesamt beste Konzept und 6 Probanden gaben an die kopfstabile Anzeige auf der Datenbrille zu bevorzugen. Alle übrigen 28 Probanden empfanden die Anzeige auf dem HUD als das insgesamt beste Anzeigekonzept.

Wurde die kopfstabile Anzeige bevorzugt, so wurde als ein Hauptgrund genannt, dass die Informationen so immer im Blick und somit zugänglich sind ( $N=4$ ). Die Versuchsperson, die die fahrzeugstabile Anzeige favorisierte, begründete die Entscheidung damit, dass einerseits die Anzeige sehr flexibel und leicht zu konfigurieren sei, diese andererseits aber nicht den Blick auf wichtige Fahrzeugelemente (wie den Rückspiegel) störe.

Die Gründe für die Wahl der Anzeige auf dem Head-Up Display waren besonders die feste, ruhige Position ( $N=15$ ) der Anzeige sowie die nicht vorhandene Verdeckung realer Objekte in Kombination mit einer optimalen Anzeigeposition ( $N=4$ ). Es nahmen jedoch auch Probanden teil, die das Tragen einer Datenbrille pauschal ablehnten ( $N=3$ ) oder die das Potenzial der Datenbrille aufgrund mangelnder technischer Reife zu diesem Zeitpunkt nach eigenen Angaben noch nicht abschätzen konnten ( $N=2$ ).

Die subjektive Einschätzung der Probanden, bei welchem Konzept sie den Blick länger von der Straße abwenden mussten, war dabei relativ ausgeglichen. Insgesamt neun Versuchspersonen waren der Meinung, ihren Blick bei der Anzeige mit der Datenbrille grundsätzlich länger von der Straße abwenden zu müssen als bei einem Head-Up Display, um die dargestellte Information nutzen zu können. Insgesamt sechs Probanden sahen das genau andersherum: ihrer Meinung nach verkürzte die Darstellung der Inhalte auf der Datenbrille die Dauer der Blickabwendung im Vergleich zum Head-Up Display. Alle übrigen Probanden sahen hier keinen Unterschied.

Die **subjektiven Äußerungen** der Versuchspersonen während der letzten Fahrt mit der fahrzeugstabilen Datenbrillen-Anzeige wurden vom Versuchsleiter protokolliert und im Nachgang inhaltlich gruppiert.

Der während der Beurteilung durch die Probanden am häufigsten genannte positive Aspekt ist, dass diese Anzeigevariante wesentlich weniger störend empfunden wurde ( $N=9$ ). Fünf Probanden äußerten sich zudem überrascht darüber, dass die Illusion fahrzeugfester Anzeigen gut gelungen ist und drei Probanden betonten, dass bei einem Spiegelblick nun keine störenden virtuellen Inhalte mehr zu sehen waren.

Negativ wurden besonders das „Zittern“ und „Wackeln“ der virtuellen Inhalte hervorgehoben ( $N=27$ ). Auch die Latenz der Anzeigen bei Kopfbewegungen war nach Eindruck von über der Hälfte der Probanden zu hoch und damit problematisch ( $N=18$ ). Weitere acht Versuchspersonen bemängelten zudem, dass die Anzeigen nicht wirklich ortsfest seien, ein Problem, das wohl als Folge der beiden zuletzt genannten Phänomene auftrat.

Weitere Negativpunkte, die von den Studienteilnehmern oft genannt wurden, sind wohl dem relativ kleinen Anzeigebereich in der Datenbrille zuzuschreiben. So sagten vier Probanden explizit, dass ein größerer Anzeigebereich notwendig sei, fünf Probanden fiel auf,

dass man – anders als im Head-Up Display – horizontale Kopfbewegungen nicht durch entsprechend entgegenwirkende Augenbewegungen ausgleichen könne. Außerdem, so äußerten sich sechs Studienteilnehmer, hätten kleine Kopfrotationen einen zu großen Einfluss auf die Position der Anzeige, da diese sofort aus dem Blickfeld verschwindet oder zumindest angeschnitten wird.

Außer positiven und negativen Eindrücken zu fahrzeugstabilen Anzeigen, konnten in diesem Teil der Studie auch konkrete Anregungen für die künftige Konzeptarbeit gewonnen werden. So betonten zwei Probanden, dass Inhalte in der Datenbrille kontextabhängig angezeigt werden sollten. So könne zum Beispiel der Zustand einer Ampel, wenn dieser durch zu nahe Distanz nicht bequem ablesbar ist, dargestellt werden. Ein weiterer Proband sah die Kopfdrehung als einen möglichen Indikator für die Situation, dass der Fahrer in den Seitenspiegel blickt. Ein Proband war sich außerdem sicher, dass es mit der Datenbrille möglich sein sollte, kritische Informationen (wie Warnungen) so darzustellen, dass es sich vorteilhaft auf die Reaktionszeit des Fahrers auswirkt. Die übrigen Äußerungen bezogen sich zum Großteil auf die weltstabile Anzeige von Navigationshinweisen oder anderer Information.

### 4.1.3 Diskussion

Dieser erste Versuch diente dazu grundlegende Vorteile und Herausforderungen der verschiedenen Formen der Informationsanzeige auf einer Datenbrille zu identifizieren und somit einen Grundstein für weiteren Untersuchungsbedarf und konkrete Konzeptarbeit zu legen.

**Vergleich der Anzeigetechnologien** Das Head-Up Display ist wegen der ähnlichen Anzeigecharakteristiken – Anzeigen überlagern ebenfalls halbtransparent die Fahrszene – die der Datenbrille ähnlichste Anzeigetechnik, die bereits heute in Serienfahrzeugen eingesetzt wird. Insbesondere die technische Überlegenheit des Head-Up Displays war, obwohl es prototypische mittels halbtransparentem Spiegel umgesetzt wurde, in diesem Versuch deutlich spürbar. So präferierten fast alle Probanden die ihnen bekannte Display-Technologie, einige davon sogar obwohl sie die potenziellen Vorteile der Datenbrille bereits erkannten.

Bei der Durchführung des Peripheral Detection Task konnten keine Unterschiede zwischen den Anzeigetechnologien festgestellt werden. Weder die durchschnittlichen Reaktionen auf die visuellen Reize, noch die durchschnittliche Anzahl der Reize auf die überhaupt nicht reagiert wurde, unterschieden sich signifikant voneinander. Da die Phasen, in denen der PDT bearbeitet werden sollte, jedoch mit einem akustischen Signal angekündigt wurden, konnten sich die Probanden bewusst auf das Erscheinen der Reize konzentrieren und für diese Phase des Versuchs den Anzeigen weniger Aufmerksamkeit widmen. Dennoch trat der erwartete Effekt, dass es den Probanden bei kopfstabiler Anzeige von Inhalten schwerer fallen würde sich auf minimale Veränderungen der Umwelt zu konzentrieren, *nicht* auf.

Auch bei den beiden modellierten Verkehrsszenarios konnten keine Unterschiede zwischen den Anzeigetechnologien festgestellt werden. Sowohl bei der Situation, bei der eine Geschwindigkeitsbeschränkung ausschließlich als virtuelle Anzeige wahrgenommen werden

konnte, als auch bei der Anzeige der Auffahrwarnung unterschieden sich die durchschnittlichen Reaktionszeiten nicht signifikant voneinander. Die extrem niedrigen Reaktionszeiten bei der zweiten Situation wurden jedoch durch ein Problem des Szenarios beeinflusst: Durch die oft sehr defensive Fahrweise der Probanden kam es meist zu gar keiner wirklich kritischen Situation und das Bremsen des Vorderfahrzeugs wurde oft schon antizipiert.

Die Vermutung, dass sich Symptome von Simulator-Krankheit durch die gleichzeitige Benutzung von Datenbrille und Simulator gegenseitig verstärken würden, konnte bestätigt werden. Fast alle abgefragten Symptome wurden bei der Anzeige von Inhalten in der Datenbrille signifikant stärker empfunden, als wenn die Anzeige im Head-Up Display stattfand. Glücklicherweise ist das Gesamtniveau für diese Symptome jedoch relativ niedrig ausgeprägt. So kann durch eine geeignete Wahl der Simulator-Strecke mit wenig Abbiegevorgängen und Beschleunigungs- sowie Bremsvorgängen dieses Ergebnis weiter positiv beeinflusst werden und der Fahrsimulator trotzdem zur Studiendurchführung benutzt werden.

**Fahrzeugstabile Anzeigen auf der Datenbrille** Besonders nachteilig an der fahrzeugstabilen Anzeige von Inhalten wurden technologische Probleme genannt. Die hohe Latenz der Positionserfassung des Kopfes und ein Rauschen (Jitter) in den Messwerten wurde von den Probanden deutlich als unangenehm und störend wahrgenommen. Die von den Probanden als „Schwimmen“ und „Wackeln“ bezeichnete Unstetigkeit der Anzeigenposition würde sich wahrscheinlich auch störend auf die Fahraufgabe auswirken.

Als weiteres Problem wurde der kleine Anzeigebereich auf der Datenbrille identifiziert. Das ständige „Abschneiden“ der Anzeigen als Resultat davon tritt besonders bei Kopftationen auf, da sich bereits kleine Rotationswinkel deutlich auf die Position der Anzeigen auswirken.

Positiv wurde bei dieser Anzeigeform von den Studienteilnehmern die feste Position an einer Stelle im Fahrzeug empfunden. Ähnlich zu einem physikalischen Head-Up Display werden so Verdeckungseffekte kontrolliert und unerwünschte Verdeckungen von real existierenden Objekten vermieden. Außerdem werden die in dieser Studie verwendeten Anzeigen zum Großteil überhaupt nicht ständig benötigt, wodurch sich eine feste Anzeigenposition anbietet. Da der hier verwendete Head-Up Display Prototyp theoretisch an verschiedenen Stellen im Fahrzeug montiert werden kann und auch eine gewisse Skalierbarkeit bezüglich des Anzeigebereichs ermöglicht, bietet sich diese Technologie für zukünftige Studien als Vergleichs- oder Ersatztechnologie an. So kann der Einfluss der unreifen Technologie einer Datenbrille auf die Bewertung eines Konzepts kontrolliert oder gar ganz vermieden werden.

**Kopfstabile Anzeigen auf der Datenbrille** Die von den Probanden genannten Vorteile der kopfstabilen Anzeige auf der Datenbrille beziehen sich meist auf deren technisch einfache Umsetzung. Da sie sich immer an der gleichen Position im Anzeigebereich befinden, haben Tracking- Ungenauigkeiten oder der kleine Anzeigebereich der Datenbrille hier überhaupt keine Auswirkung.

Die ständige Anzeige von Inhalten im Blickfeld des Fahrers hat jedoch auch den Nachteil, dass es zu unerwünschten Überlagerungen mit Objekten der Umwelt kommen kann. Schulter- und Spiegelblicke, die Prüfung des Querverkehrs beim Überqueren von Kreuzungen, oder Schwierigkeiten bei der Bedienung von anderen Displays im Fahrzeug können

die Folge sein. Bei der Anzeige von kritischen Informationen jedoch kann genau diese Eigenschaft ein Vorteil sein: unabhängig von der Blickrichtung des Fahrers können beispielsweise Warnungen angezeigt werden und so sichergestellt werden, dass diese auch schnellstmöglich vom Fahrer wahrgenommen werden. Dies könnte auch in Situationen vorteilhaft sein, in denen das Fahrzeug die Fahraufgabe größtenteils übernimmt (automatisiertes Fahren). Hier ist der Fahrer potenziell stärker vom Verkehrsgeschehen abgelenkt, jedoch kann sein Eingreifen letztlich dennoch erforderlich werden.

Sehr interessant sind die Äußerungen von Probanden Informationen kontextsensitiv und/oder abhängig von der Kopfdrehung anzuzeigen oder auszublenden. Dieser Ansatz wird im Rahmen dieser Arbeit mit unterschiedlichen Mitteln weiterverfolgt.

Sowohl kopfstabile als auch fahrzeugstabile Anzeigen haben im Fahrzeug jeweils Vor- und Nachteile. Während sich bei fahrzeugstabilen Inhalten besonders die technische Unreife von Tracking-System und Datenbrille negativ bemerkbar macht, so treten bei der kopfstabilen Anzeige häufig unerwünschte Verdeckungseffekte mit Objekten der realen Umgebung auf.

## 4.2 Anzeigeort, Anzeigegröße und Anzeigemenge

Das Kapitel 4.2 basiert auf der Masterarbeit: „Systematische Untersuchung relevanter Faktoren im Umgang mit Visualisierungen in Head-Mounted Displays im Fahrzeug“. Die Masterarbeit wurde angefertigt von Cornelius Back (2014). Themenstellung und Betreuung wurden von Felix Lauber vorgenommen. Die Programmierung der für die Untersuchungen notwendigen Software, die Durchführung der Studien sowie wesentliche Teile deren Auswertung wurden von Cornelius Back geleistet.

### 4.2.1 Motivation und Untersuchungsgegenstand

Während die erste Studie darauf abzielte einen Überblick über die grundsätzlichen Unterschiede der verschiedenen Visualisierungsarten auf Datenbrillen zu gewinnen, so konzentriert sich diese Studie nun ausschließlich auf kopfstabile Anzeigen. Im Unterschied zu fahrzeugstabilen Anzeigen sind diese mit heute erhältlicher Technologie bereits umsetzbar und könnten für bestimmte Anwendungsfälle durchaus als Alternative zu einem Head-Up Display in Frage kommen.

Bei der Entwicklung eines entsprechenden Konzepts wäre es jedoch wünschenswert mehr über grundlegende Anzeigeparameter zu wissen. Auch wenn der Anzeigebereich in heutigen Datenbrillen noch relativ klein ist, so bietet er dennoch eine gewisse Flexibilität bei der Positionierung der Anzeigen. Daher soll durch die im Folgenden beschriebene Studie sowohl identifiziert werden, welche Position im Anzeigebereich der Datenbrille für die Anzeige von kopfstabilen Inhalten ideal ist, als auch welche Einflussfaktoren hierfür maßgeblich sind. Da zu erwarten ist, dass diese Einflussfaktoren verschiedenen Ursprungs sein

können, wird die Studie zweigeteilt und sowohl in einem (stehenden) Realfahrzeug auf der Straße durchgeführt, als auch in einer dynamischen Fahrsimulatorumgebung.

Im Bereich der Head-Up Displays wurden bereits Studien durchgeführt, um die optimale Anzeigeposition für Warnungen [171, 181] oder Text [165] zu finden. Hier stellte sich das Zentrum des HUD als besonders vorteilhafter Anzeigeort bezüglich Reaktionszeiten beziehungsweise Ablesbarkeit dar. Einflüsse auf die Fahrleistung konnten bei den genannten Studien nicht identifiziert werden. Die Übertragung dieser Ergebnisse auf die kopfstabile Anzeige von Informationen in der Datenbrille ist allerdings nicht möglich. Da der Anzeigebereich einer Datenbrille im Unterschied zu einem Head-Up Display beweglich ist, verändert sich die Anzeigeposition relativ zur Umgebung mit der Kopfbewegung des Trägers.

Bei monokularen Datenbrillen wurden Untersuchungen für die Positionierung des Display-Elements vor dem Auge durchgeführt (Überblick in [120]). Das Ergebnis war dabei, dass die wahrnehmungsspezifischen Probleme von monokularen Datenbrillen (siehe auch Kapitel 2.3.2) abnehmen, wenn das Display-Element  $15^\circ$  ober- beziehungsweise unterhalb des Auges positioniert wird. Die Datenbrillen, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden sind jedoch bi-okular und die umgangenen Probleme treten bei dieser Bauweise ohnehin nur eingeschränkt auf. Zudem wurden entsprechende Studien in anderen, meist militärisch motivierten Szenarios durchgeführt und die Ergebnisse sind auch hier nicht ungeprüft auf den Nutzungskontext im Automobil übertragbar.

Nach entsprechenden Untersuchungen bezüglich einer optimalen Anzeigeposition und -Größe auf einem Head-Mounted Display, wird in diesem Unterkapitel eine weitere Studie beschrieben, die den Einfluss der Anzeigenmenge auf die Fahrleistung und Wahrnehmung der Anzeigeninhalte untersucht. Insbesondere soll eine obere Grenze für die Anzahl der angezeigten Inhalte identifiziert werden, bis zu der kein negativer Einfluss auf die genannten abhängigen Parameter gemessen werden kann. Eine ähnliche Studie im Bereich der Head-Up Displays wurde bereits von Ecker durchgeführt [37]. Der einzige signifikante Unterschied zwischen drei, fünf und sieben gleichzeitig angezeigten Listenelementen wurde dabei für die Anzahl der Blicke gemessen: Probanden benötigten signifikant mehr Blicke in das Head-Up Display wenn sieben Listenelemente gleichzeitig angezeigt wurden als wenn es lediglich drei waren. Ein Einfluss auf die Fahrleistung wurde dagegen nicht festgestellt.

### 4.2.2 Studie I: Anzeigeposition und -Größe

Bei der Untersuchung einer idealen Anzeigeposition und -Größe wurde in zwei Schritten vorgegangen. Zunächst wurde eine qualitative Studie in einem auf der Straße stehenden Fahrzeug durchgeführt. Danach wurden die Ergebnisse dieser Studie nochmals in einer dynamischen Umgebung in der Fahrsimulation verifiziert. Zielsetzung in beiden Teilen der Studie war abhängig von dem gewählten Szenario die entscheidenden Einflussparameter für Position und Größe der angezeigten Inhalte zu identifizieren und ideale Werte hierfür zu bestimmen.

Die Anzeige in der Datenbrille orientierte sich dabei inhaltlich an aktuellen Head-Up Displays und bestand aus einer Angabe über die aktuell gefahrene Geschwindigkeit, einer Navigationsanzeige und einem Geschwindigkeitsbegrenzungssymbol. Die Größe eines

Symbols und die Schriftgröße für Textinhalt wurden gemäß der Ergebnisse einer nicht im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten BMW-internen Untersuchung gewählt. Für die LUMUS DK-32 Datenbrille wurden demzufolge 60-70 Bogenminuten für die aktuelle Geschwindigkeit, 33-37 Bogenminuten für sonstige Textinhalte (wie die „km/h“-Angabe) und 115-120 Bogenminuten für ein Geschwindigkeitsbegrenzungssymbol gewählt. Die Maßangaben in Bogenminuten beziehen sich dabei auf die vertikale Ausdehnung im Sichtfeld (siehe Kapitel 2.1.2).

### *Teil 1: Evaluation im stehenden Fahrzeug*

**Aufbau** Der erste Teil der Studie wurde in einem auf der rechten Fahrspur geparkten Fahrzeug der BMW 5er-Baureihe durchgeführt. Die zum Einsatz kommende Datenbrille war das Modell LUMUS DK-32 (siehe Kapitel 3.3.3).

**Stichprobe** Insgesamt 17 Probanden nahmen an der Studie teil, davon waren vier Versuchspersonen weiblich und 13 männlich. Das Alter der Probanden lag zwischen 21 und 52 Jahren ( $M=29,3$ ,  $SD=9$ ). Fünf der 17 Versuchsteilnehmer hatten eine Sehschwäche, die während des Versuchs mittels Kontaktlinsen oder den in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Korrekturgläsern korrigiert wurde.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Nach der Begrüßung wurden Probanden zunächst aufgefordert auf dem Fahrersitz des Versuchsfahrzeugs Platz zu nehmen und, wenn nötig, Lenkrad-, Sitz- und Spiegelpositionen anzupassen. Nach einer kurzen Einführung durch den Versuchsleiter wurden die Studienteilnehmer instruiert den Sicherheitsgurt anzulegen und die Körperhaltung einzunehmen, die sie auch während einer normalen Autofahrt bevorzugen. Anschließend wurden die Probanden gebeten sich die Datenbrille aufzusetzen und die unterschiedlichen Anzeigepositionen zu bewerten.



**Abbildung 4.5:** Anzeigehalte und mögliche Basis-Anzeigepositionen im ersten Teil der Studie.

Die angezeigten Inhalte wurden so angeordnet, dass sie eine rechteckige Form einnahmen und einen Platz von etwa  $3,75^\circ$  in x- und y-Richtung bedeckten. Der Prototyp war



nicht funktionsfähig, es wurde lediglich ein Standbild mit einer fiktiven Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsbegrenzung und einem willkürlich ausgewählten Navigationspfeil angezeigt. Es wurden insgesamt sieben Basis-Anzeigepositionen ausgewählt (siehe auch Abbildung 4.5) und den Probanden nacheinander und in randomisierter Abfolge präsentiert.

Bei den Basis-Positionen handelte es sich um die vier Ecken des Anzeigebereichs ( $x = \pm 13^\circ, y = \pm 6^\circ$ ), das Zentrum ( $x = 0^\circ, y = 0^\circ$ ) und das Zentrum am jeweils oberen und unteren Rand des Anzeigebereichs ( $x = 0^\circ, y = \pm 6^\circ$ ). Die angegebenen Positionen beziehen sich dabei immer auf das Zentrum der angezeigten Inhalte relativ zum gesamten Anzeigebereich.

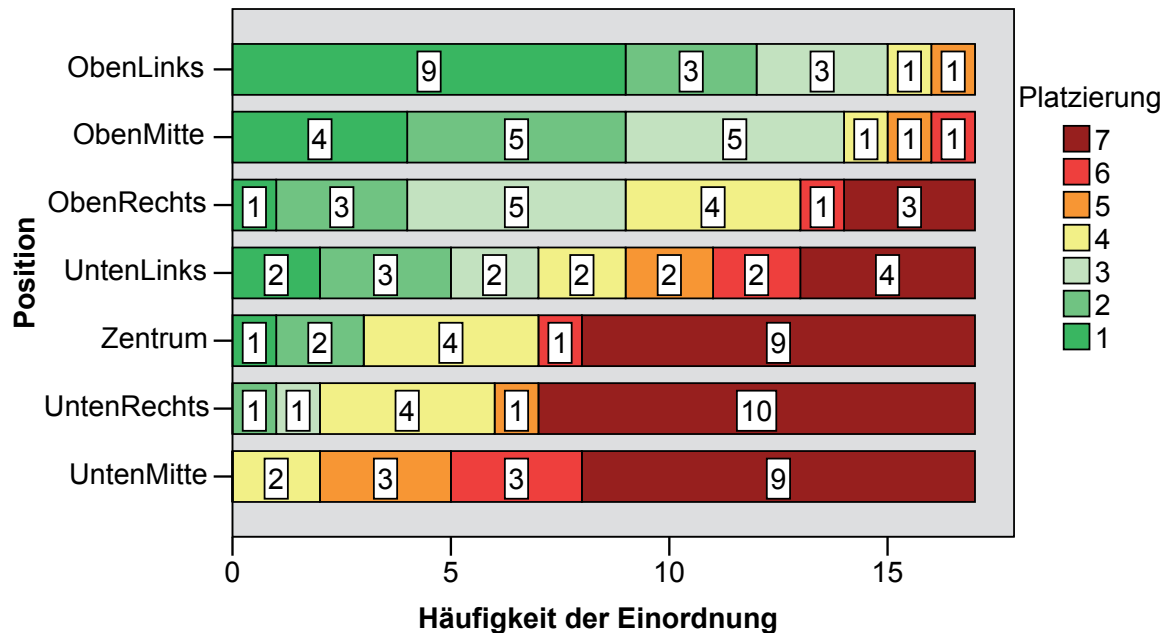
Alle Basis-Anzeigepositionen wurden jeweils in sechs verschiedenen Szenarios angezeigt. Alle Probanden wurden mit allen Anzeigepositionen in allen Szenarios konfrontiert (Within-Subjects-Design).

Ein Szenario bestand dabei immer aus einer typischen Verkehrssituation. Diese wurde zunächst vom Versuchsleiter erklärt, wonach die Probanden die Aufgabe hatten, sich in dieses Szenario hineinzusetzen und typische Blickmuster bewusst nachzuvollziehen. Dabei sollten die Probanden immer erklären, was ihnen bei der aktuellen Anzeigeposition positiv und negativ auffällt und wie gut die Anzeigeposition ihrer Meinung nach zu dem aktuell durchlaufenen Szenario passt. Folgende sechs Szenarios wurden dabei durchlaufen:

- Gewöhnliche Stadtfahrt: Entspannte Kopfhaltung und geradeaus gerichteter Blick auf die unmittelbar vor dem Fahrzeug befindliche Fahrbahn und das Verkehrsgeschehen.
- Spurwechsel: Blick in den linken Seitenspiegel und Blick über die linke Schulter.
- Rechtsabbiegemanöver: Blick in den Innenspiegel, über die rechte Schulter und in den Kurvenausgang.
- Parkvorgang: Abwechselnde Blicke nach hinten, vorne und in den rechten Seitenspiegel.
- Interaktion mit Anzeigen im Innenraum: Blick in das Kombi-Instrument und in das CID.
- Entspannte Autobahnfahrt: Entspannte Kopfhaltung und Blick auf weiter entferntes Verkehrsgeschehen.

Nachdem alle Szenarios durchlaufen waren, bildete jede Versuchsperson eine Rangfolge für die Basis-Anzeigepositionen. Abschließend konnten die Versuchspersonen die von ihnen favorisierte Position unabhängig von den Basispositionen bestimmen. Hierzu wurde die Anzeige zunächst im Zentrum des Anzeigebereichs dargestellt, woraufhin die Probanden die Möglichkeit hatten diese mittels eines Touch-Pads in alle Richtungen frei zu verschieben. Einerseits sollte durch dieses Vorgehen vermieden werden, dass die jeweilige Optimalposition nicht in der Auswahl vorhanden ist, andererseits auch, dass Probanden bestimmte Anzeigepositionen bereits ausschließen ohne sie überhaupt erlebt zu haben. Probanden bekamen nun nochmals die Möglichkeit mit der gewählten Position die vorher beschriebenen Szenarios zu durchlaufen und eventuelle Korrekturen vorzunehmen. Schließlich wurde die Position vom Versuchsleiter durch einen Tastendruck protokolliert.

**Ergebnisse** Die Ergebnisse der Rangfolgenbildung der unterschiedlichen Positionen durch die Versuchsteilnehmer werden in Abbildung 4.6 dargestellt.



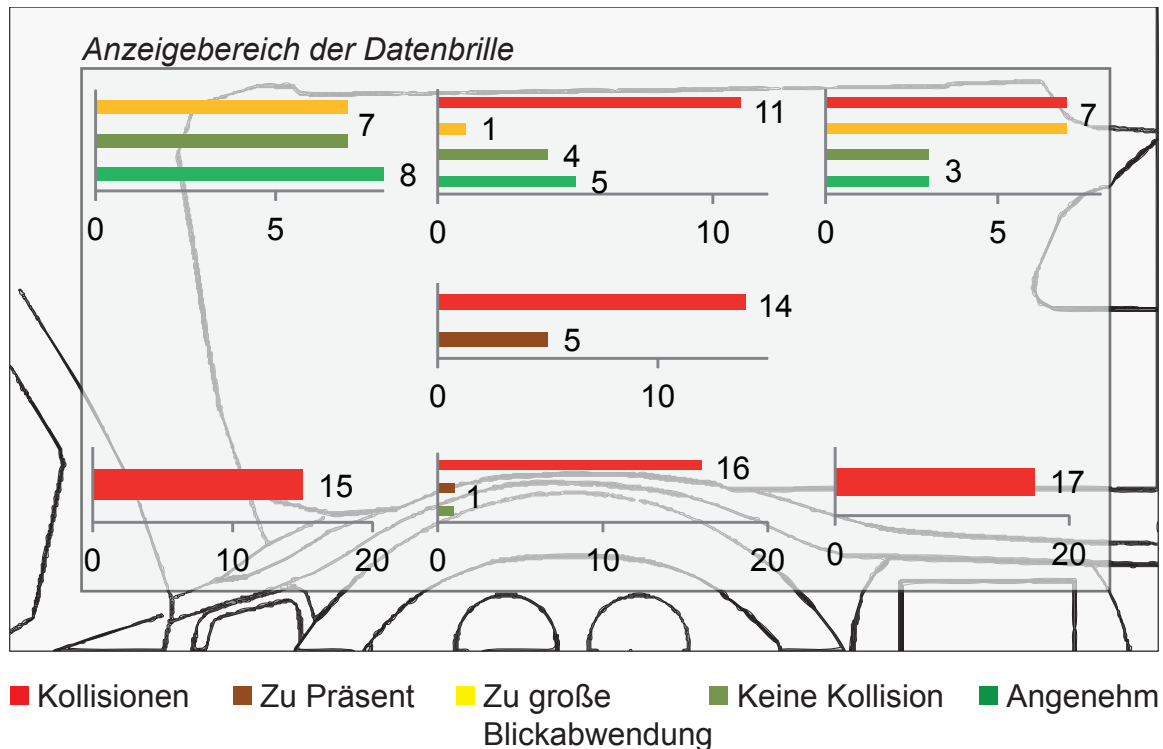
**Abbildung 4.6:** Anzeigepositionen und die kumulierte Rangfolge der Probanden. Die Positionen eins bis drei werden dabei in Grüntönen dargestellt, die Positionen vier bis sieben in den Farbtönen gelb und rot.

Ein Friedman-Test ergab, dass die Rangeinordnungen der einzelnen Positionen signifikant voneinander abweichen. Paarweise durchgeführte Wilcoxon-Tests ergaben signifikante Unterschiede bei der Rangverteilung für die einzelnen Positionen. So wird die Position „Oben Links“ mit einem mittleren Rang von 1,97 signifikant besser eingeschätzt als alle übrigen Positionen bis auf „Oben Mitte“ ( $p < 0,05$ ). Die am zweitbesten bewertete Position ist „Oben Mitte“ mit einem mittleren Rang von 2,59 gefolgt von „Oben Rechts“ mit einem mittleren Rang von 3,62. Eindeutig am schlechtesten bewertet wurde die Position „Unten Mitte“ mit einem mittleren Rang von 5,65. Entsprechende Wilcoxon-Tests mit Bonferroni adjustiertem Signifikanzniveau ergaben signifikante Unterschiede zwischen den Positionen „Unten Mitte“ und „Oben Links“ sowie „Oben Mitte“, „Zentrum“ und „Oben Links“ sowie auch zwischen „Unten Rechts“ und „Oben Mitte“ ( $p < 0,002$ ).

Auffällig ist, dass die subjektive Bewertung der Probanden von links nach rechts sowie von oben nach unten tendenziell negativer wird. So wird die Anzeigeposition „oben links“ am häufigsten auf die oberen Ränge platziert, während die unteren Anzeigepositionen eher auf die unteren Ränge gewählt werden.

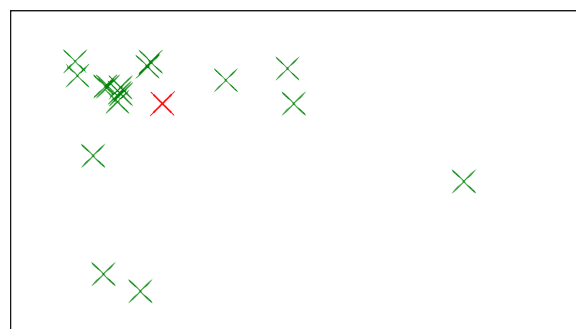
Die Aussagen der Probanden während der Evaluation wurden vom Versuchsleiter protokolliert und anschließend inhaltlich gruppiert. Insbesondere die Begründungen für die Einordnung der Anzeigepositionen in die Rangfolge wurden so gesammelt und in fünf Kategorien eingeordnet (siehe auch Abbildung 4.7). Wurde eine Anzeigeposition als passend empfunden und in eine der oberen Ränge eingeordnet, so wurde dies meist damit begründet, dass es für diese Anzeigeposition wenig oder keine „Kollisionen“ mit realen Objekten (wie zum Beispiel Spiegeln, anderen Bildschirmen oder auch Straßenschildern) gab. Oft wurde eine

Position auch einfach als „angenehm“ bezeichnet. Ein Aspekt, der eher gegen eine Anzeigeposition und somit für eine Einordnung in einer der unteren Ränge sprach, war beispielsweise eine „zu große Blickabwendung“. Besonders negativ wurde es allerdings von den Probanden gesehen, wenn es durch die Wahl einer ungünstigen Anzeigeposition zu „Kollisionen“ mit Objekten der realen Welt kam, oder wenn die Anzeige als „zu präsent“ empfunden wurde. In letzterer Kategorie wurden Aussagen gesammelt, die eine Anzeige als zu aufdringlich oder penetrant und dadurch störend bezeichneten.



**Abbildung 4.7:** Gründe für oder gegen die Wahl einer Anzeigeposition.

Bei der freien Positionierung der Anzeigen durch die Probanden ergab sich ein sehr ähnliches Bild (siehe Abbildung 4.8).



**Abbildung 4.8:** Ergebnisse der freien Positionswahl (grüne Markierungen) mit gemittelter Favoritenposition (rote Markierung).

Die Mehrzahl der Probanden favorisierte eine Position im linken, oberen Viertel des Anzeigebereichs. Die gemittelte Favoritenposition liegt auf der Position ( $x=-8,25^\circ$ ,  $y=4,2^\circ$ ) mit einer Standardabweichung von ( $x=6,2^\circ$ ,  $y=4,3^\circ$ ).

Im ersten Teil dieser Versuchsreihe wurde ein entscheidender Faktor für die Wahl der idealen Positionierung von Inhalten innerhalb des Anzeigebereichs der Datenbrille identifiziert: die mögliche Verdeckung von realen Objekten der Außenwelt und des Fahrzeugs. Die favorisierte Position der Probanden liegt dabei im linken, oberen Quadranten des Anzeigebereichs ( $M=(x=-8,25^\circ, y=4,2^\circ)$ ).

### *Teil 2: Verifikation der Ergebnisse im Fahrsimulator*

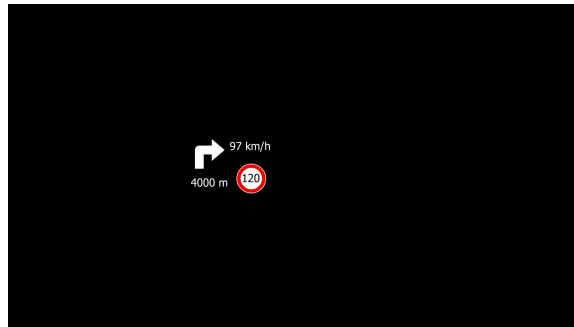
Nachdem im ersten Teil der Untersuchung wichtige Einflussparameter für die Positionierung von Inhalten auf der Datenbrille identifiziert wurden, werden diese Ergebnisse nun in einer dynamischen Umgebung überprüft. Außerdem wird überprüft, welchen Anteil am Sichtfeld des Probanden die Anzeige insgesamt haben kann, bevor dies, beispielsweise durch zu starke Verdeckungseffekte, unangenehm wird.

**Aufbau** Der zweite Teil der Untersuchung fand in dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen „Statischen Simulator“ statt. Auf den optionalen HUD-Aufbau wurde in dieser Studie verzichtet. Die zum Einsatz kommende Datenbrille war ebenfalls die „LUMUS DK-32“ (siehe Kapitel 3.3.3).

**Stichprobe** An der Untersuchung nahmen insgesamt 12 Versuchspersonen teil, davon sieben Frauen und fünf Männer. Keiner der teilnehmenden Probanden hatte bereits am ersten Teil der Versuchsreihe teilgenommen, somit konnte eine mögliche Voreingenommenheit ausgeschlossen werden. Das Alter der Probanden lag zwischen 19 und 54 Jahren ( $M=30,1$ ,  $SD=9,8$ ). Sieben Versuchspersonen litten an einer Sehschwäche, die während des Versuchs durch Kontaktlinsen oder entsprechende Korrekturgläser an der Datenbrille korrigiert wurde.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Nach der Begrüßung und Erfassung der demographischen Daten wurden die Probanden gebeten die Datenbrille aufzusetzen und auf dem Fahrersitz der Sitzkiste Platz zu nehmen. Anschließend bekamen alle Versuchspersonen dann die Gelegenheit sich im Rahmen einer Eingewöhnungsfahrt an Simulator, Szenario und das Fahren mit der Datenbrille zu gewöhnen. Hierbei wurden jedoch zunächst noch keine Inhalte in der Datenbrille angezeigt.

Alle Probanden absolvierten jeweils vier Messfahrten (Within-Subjects Design). Von diesen vier Messfahrten wurden jeweils zwei in einem Stadt-Szenario und zwei auf einer einfachen Autobahnstrecke durchgeführt. Die Reihenfolge der Szenarios wurde dabei blockweise permutiert (beide Stadt- beziehungsweise Autobahnfahrten fanden jeweils unmittelbar nacheinander statt). Die in der Datenbrille angezeigten Inhalte (Abbildung 4.9) waren im Unterschied zum ersten Teil der Untersuchung funktional, das heißt alle angezeigten Inhalte bildeten den aktuellen Fahr-Kontext zu jedem Zeitpunkt korrekt ab. Die primäre Aufgabe der Probanden war dabei, sich an die Verkehrsregeln zu halten (insbesondere die Geschwindigkeitsbeschränkungen) und die, durch die Anzeige vorgegebenen, Navigationsanweisungen zu befolgen.



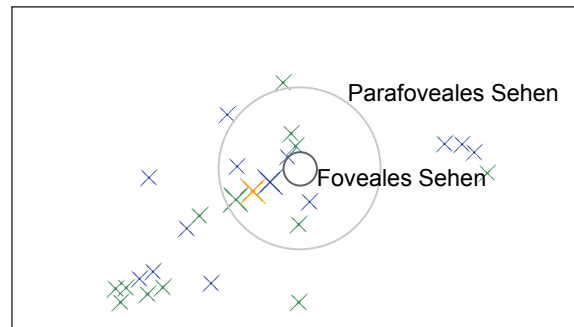
**Abbildung 4.9:** Die Anzeigeninhalte während des zweiten Teils der Untersuchung.

Die jeweils erste und dritte Messfahrt diente dazu, eine Favoritenposition und maximale Größe der Inhalte auf dem Anzeigebereich der Datenbrille zu finden. Hierzu wurden die Inhalte zunächst im Zentrum des Anzeigebereichs dargestellt. Die Probanden hatten dann die Möglichkeit die Anzeige innerhalb des Anzeigebereichs der Datenbrille in beiden Dimensionen zu verschieben. In mehreren Iterationen gaben sie dem Versuchsleiter hierzu Anweisungen zur Positionsänderung, welche dann unmittelbar an der Anzeige vorgenommen wurden. Die neue Anzeigeposition konnte dann von den Probanden während der Fahrt erprobt und gegebenenfalls erneut korrigiert werden. Während dieses Vorgangs wurden die Probanden gebeten, sich über die Gründe einer Positionsänderung verbal zu äußern. Wurde eine optimale Position gefunden, wurde analog mit der Größe der Inhalte verfahren. Anzeigeninhalte wurden vom Versuchsleiter so lange skaliert, bis sie nach Meinung des Probanden eine gerade noch tolerierbare Größe hatten, ohne die Kriterien zu verletzen, die zu der vorherigen Positionswahl geführt hatten.

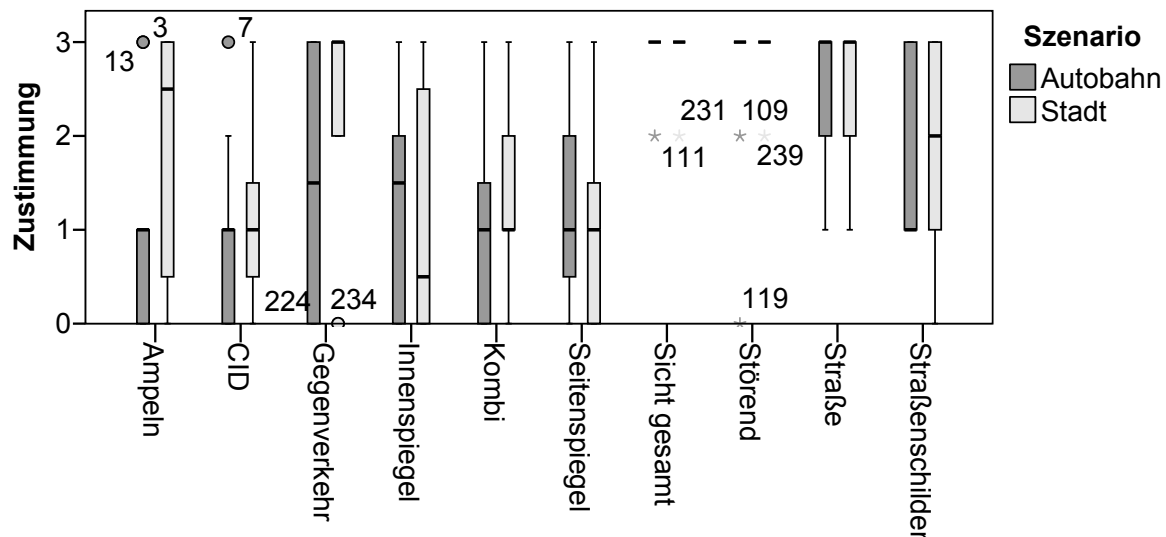
Die jeweils zweite und vierte Messfahrt diente dazu die gerade ermittelte Anzeigeposition und -Größe zu verifizieren. Dabei wurden die Versuchspersonen instruiert sich nicht in besonderem Maße auf die Inhalte zu konzentrieren, die Fahraufgabe bestmöglich zu meistern und dem Versuchsleiter gegebenenfalls noch Änderungswünsche für die Position und Größe der Anzeigen mitzuteilen. Anschließend wurden beide Werte protokolliert. Außerdem wurde nach diesen beiden Fahrten jeder Proband gebeten einen kurzen Fragebogen auszufüllen, in dem mittels Likert-Skalen die Gründe für die Wahl der Position und Größe der Anzeigen bestimmt wurden. So wurde beispielsweise nach der Zustimmung beziehungsweise Ablehnung bezüglich möglicher Sichtverdeckungsprobleme und Blickabwendungen gefragt.

**Ergebnisse** Im Vergleich zur Idealposition aus dem ersten Teil der Untersuchung wurden die Inhalte deutlich weiter im Zentrum der Anzeige positioniert. Der Mittelwert über alle Probanden und Szenarien liegt bei ( $x=-2,85^\circ$ ,  $y=-1,31^\circ$ ), eine minimale Verschiebung in Richtung linke, untere Ecke vom Zentrum aus gesehen (Abbildung 4.10).

Auch wenn beide Szenarios getrennt voneinander betrachtet werden, so sind die Unterschiede zwischen der gemittelten Favoritenposition im Stadt-Szenario ( $x=-3,89^\circ$ ,  $y=-1,85^\circ$ ) mit einer Standardabweichung von ( $x=6,21^\circ$ ,  $y=2,40^\circ$ ) und der mittleren Favoritenposition im Autobahn-Szenario ( $x=-1,81^\circ$ ,  $y=-0,78^\circ$ ) mit einer Standardabweichung von ( $x=7,05^\circ$ ,  $y=1,83^\circ$ ) nur minimal.



**Abbildung 4.10:** Favoritenpositionen aller Probanden für das Stadt-Szenario (grün gekennzeichnet) und das Autobahn-Szenario (blau gekennzeichnet). Mittelwerte für beide Szenarios sind vergrößert hervorgehoben, der Mittelwert über alle Szenarios ist gelb gekennzeichnet. Die beiden Kreise umschließen den Bereich des fovealen (2°) und parafovealen (10°) Sehens in Bezug auf ein willkürlich gewähltes Zentrum.

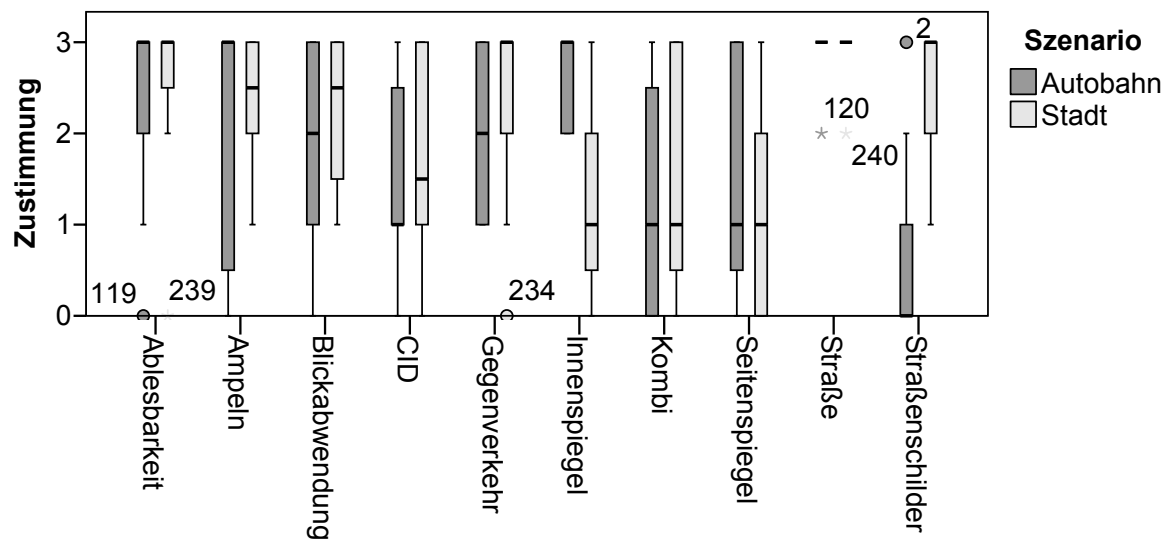


**Abbildung 4.11:** Gründe für die Positionswahl der Probanden beiden Szenarios.

Die Gründe, die von den Versuchspersonen in den beiden Szenarios als maßgeblich für die Wahl der Anzeigeposition betrachtet werden können in Abbildung 4.11 nachvollzogen werden. Deutliche Unterschiede zwischen den Szenarios bestehen in der Anforderung eine unbeeinträchtigte Sicht auf Ampeln, Straßenschilder, den Innenspiegel und den Gegenverkehr zu gewährleisten. In beiden Szenarios waren die wichtigsten Faktoren die freie Sicht auf die Straße und die Ablesbarkeit der Inhalte.

Die mittlere Gesamtgröße, die von den Versuchspersonen noch als angenehm empfunden wurde, beträgt 5,6° in x- und y-Ausdehnung für die Autobahnfahrt (SD=1,1°) und 5,0° für die Stadtfahrt (SD=0,8°).

In Abbildung 4.12 können die Begründungen für die Wahl der idealen Größe der Anzeigen nachvollzogen werden. Auch hier bestehen die deutlichsten Unterschiede zwischen den Szenarios in der Anforderung eine freie Sicht auf Ampeln, den Gegenverkehr und den Innenspiegel zu gewährleisten. Als wichtigste Faktoren kristallisieren sich hier eine freie



**Abbildung 4.12:** Gründe für die Wahl der Anzeigegröße durch die Probanden beiden Szenarios.

Sicht auf die Straße, die Beeinträchtigung der Sicht insgesamt und wie störend die Anzeigen empfunden werden, heraus.

### Diskussion

Diese Studie hatte das Ziel eine optimale Anzeigeposition und -Größe für Inhalte in einer Datenbrille zu finden. Dabei wurde in zwei Stufen vorgegangen. In einer ersten Untersuchung in einem auf der Straße stehenden Fahrzeug wurden wichtige Einflussfaktoren für die ideale Positionierung identifiziert. Offensichtlich war es den Probanden dabei besonders wichtig, jegliche Überdeckung von realen Objekten durch die virtuellen Inhalte zu verhindern. Besonders der vom Fahrer aus gesehen linke, obere Bereich wurde dabei favorisiert. Dabei spielt die Sitzposition des Fahrers vermutlich eine große Rolle, die gewonnenen Ergebnisse gelten also nur für einen Linkslenker. Da sowohl die Außenspiegel als auch die in Frage kommenden Elemente des Fahrzeuginnenraums bei einem Rechtlenker achsensymmetrisch aufgebaut sind, können vermutlich die hierfür geltenden Idealpositionen durch eine einfache Spiegelung der hier gewonnenen Positionen an der vertikal verlaufenden Symmetrieachse des Anzeigebereichs errechnet werden. Weniger wahrscheinlich wird der Einfluss der Leserichtung auf die in dieser Studie gewonnenen Werte gesehen, da hierdurch der maßgebliche Faktor (Verdeckung) für die Positionswahl nicht beeinflusst wird.

Im zweiten Teil der Untersuchung wurden diese Einflussfaktoren und die daraus resultierende Anzeigeposition in einer dynamischen Umgebung, das heißt während der Fahrt, nochmals überprüft. Dabei wurden Unterschiede zur Untersuchung im stehenden Fahrzeug offengelegt: Probanden bevorzugten nun eine Position, die im Mittel sehr viel näher am Zentrum des Anzeigebereichs liegt. Hier muss allerdings beachtet werden, dass das arithmetische Mittel bei der Position nicht mit einer Idealposition für alle Probanden gleichzusetzen ist. Vielmehr wurden die Anzeigen so um das Zentrum angeordnet, dass sich die verschiedenen Abweichungen vom Zentrum aus oft ausgeglichen haben. Insbesondere wurden die Bereiche des fovealen und parafovealen Sehens weitestgehend von der Positionierung von Inhalten ausgespart. Hier ist zur Kenntnis zu nehmen, dass eine Verschiebung

dieser Sichtbereiche aufgrund unterschiedlicher Tragepositionen der Datenbrille in vertikale Richtung wahrscheinlich, in horizontale Richtung allerdings nur kaum möglich ist.

Insgesamt muss jedoch festgehalten werden, dass der Faktor „Blickabwendung“ während der Fahrt sehr viel wichtiger wurde, eine Erkenntnis, die sich auch in der Bewertung in den Likert-Skalen durch die Probanden widerspiegelt. Dass bei dieser subjektiven Einschätzung von Gründen die Verdeckung realer Objekte durch die Umwelt trotzdem noch eine große Rolle spielte, ist nicht verwunderlich. Auch die zwischen den Szenarios unterschiedlichen Gründe für oder gegen eine Position sind nicht überraschend: schließlich ist die freie Sicht auf Ampeln oder Straßenschilder in der Stadt allein durch die höhere Wahrscheinlichkeit des Auftretens wichtiger als auf der Autobahn. Dennoch, und das wird auch bei der Suche nach einer optimalen Anzeigegröße deutlich, ist die freie Sicht besonders auf die Umwelt, aber auch auf wichtige Elemente des Fahrzeugs, wohl der wichtigste Faktor bei der Bestimmung der optimalen Anzeigeposition und -größe.

Aufgrund der grundsätzlich sehr hohen Streuung der Idealpositionen in den Daten ist es an dieser Stelle nicht möglich eine ideale Anzeigeposition für alle Fahrer, alle Datenbrillen und sämtliche Tragepositionen zu finden. Unterschiedliche Tragepositionen könnten allerdings mittels eines Kalibrierungsmechanismus kontrolliert werden. So könnte die Datenbrille mittels Sensoren selbständig erkennen, in welcher geometrischen Lage sie sich relativ zu den Augen des Trägers befindet und Positionen entsprechend anpassen. Bezüglich der Datenstreuung in horizontale Richtung würde neben der Möglichkeit die Position der Inhalte frei konfigurierbar zu machen, eine kontextabhängige Anzeige viele unerwünschte Verdeckungen verhindern und so eine allgemeingültige Favoritenposition wahrscheinlicher machen.

Vergleicht man die ideale Anzeigeposition während der Fahrt mit der in einem stehenden Fahrzeug, fällt auf, dass die Blickabwendung als neuer Einflussfaktor an entscheidender Bedeutung gewinnt. Hierdurch und durch eine größere Variabilität der Kopfbewegungen während der Fahrt rückt die favorisierte Anzeigeposition fast bis ins Zentrum, während gleichzeitig die Varianz der Anzeigepositionen unter den Probanden sehr groß wird. Weiterhin wird deutlich, dass eine Gesamtanzeigegröße von  $5,6^\circ$  in beide Anzeigendimensionen nicht überschritten werden sollte.

### 4.2.3 Studie II: Informationsmenge

In dieser Studie wird untersucht, wie groß die maximale Anzahl der gleichzeitig angezeigten Elemente im Anzeigebereich der Datenbrille sein darf, ohne dass negative Effekte auf die Durchführung der Fahraufgabe zu erwarten sind. Es wird erwartet, dass die Gesamtkomplexität der Anzeige und somit die davon erzeugte kognitive und insbesondere visuelle Last mit der Anzahl der angezeigten Elemente steigt. Dies hätte zur Folge, dass es einen bestimmten Punkt gibt, an dem diese Arbeitslast so groß ist, dass nicht mehr ausreichend Ressourcen für die Durchführung der Fahraufgabe zur Verfügung stehen.

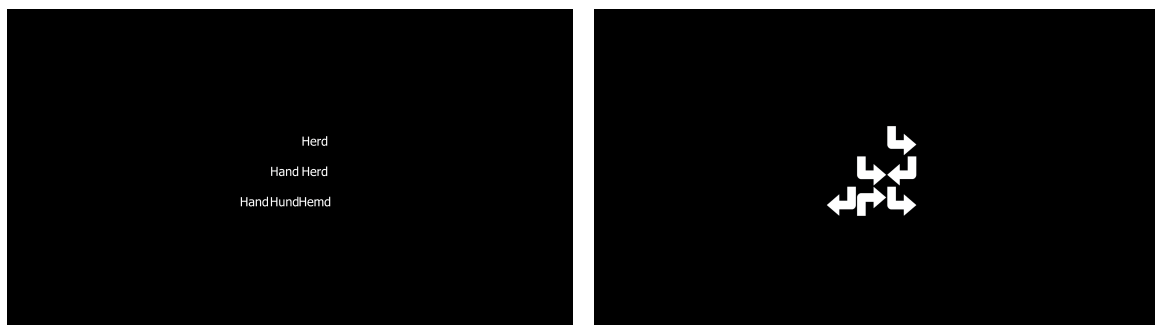
**Aufbau** Die Studie fand in dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen „Statischen Simulator“ statt unter Benutzung der im gleichen Kapitel beschriebenen Sitzkiste. Als Datenbrille kam



wieder die in Kapitel 3.3.3 beschriebene LUMUS DK-32 zum Einsatz (siehe Kapitel 3.3.3). In einer Vergleichsbedingung wird in dieser Studie außerdem der in Kapitel 3.3.2 beschriebene HUD-Aufbau, mit Displaykonstruktion auf dem Dach der Sitzkiste, verwendet.

**Stichprobe** An dem Versuch nahmen insgesamt 46 Probanden teil. Neun Versuchspersonen waren weiblich und 37 männlich. Das Alter der Teilnehmer lag zwischen 18 und 60 Jahre ( $M=31,8$  Jahre,  $SD=10,8$ ). Insgesamt 17 Probanden litten an einer Sehschwäche, die während des Versuchs durch Kontaktlinsen oder entsprechende Korrekturgläser ausgeglichen wurde. Die folgende Auswertung beruht aufgrund eines Fehlers im Protokollierungsmechanismus allerdings nur auf validen Datensätzen von 45 Versuchspersonen.

**Sekundäraufgabe** Die für diese Studie verwendete Sekundäraufgabe besteht aus einer, für den Fahrzeugkontext angepassten, visuellen Suchaufgabe. Zwei Klassen von Information wurden dafür verwendet: textuelle Information wie sie in Fahrzeuganzeigen, beispielsweise für die Anzeige der Geschwindigkeit, verwendet wird, sowie symbolische Inhalte, wie beispielsweise Navigationsanweisungen und Geschwindigkeitsbeschränkungen. Als Beispiel für eine symbolische Information wurde für die folgende Studie ein Navigationspfeil ausgewählt. Die Symbole und Wörter wurden dabei jeweils so ausgewählt, dass sie sich in der Mehrzahl der Unterscheidungsmerkmale sehr ähnlich sind, um Pop-Out-Effekte (herausstechen eines Elements aufgrund präattentiv wahrnehmbarer Merkmale [179]) zu vermeiden. Die Gesamtmenge an Symbolen bestand aus vier rechtwinkligen Pfeilen, die Gesamtmenge an Wörtern bestand aus den Worten *Hemd*, *Held*, *Hand* und *Hund*. In beiden Fällen wurden die Elemente dabei rechteckig angeordnet und im Zentrum des Anzeigebereichs dargestellt (siehe Abbildung 4.13).



**Abbildung 4.13:** Visueller Suchtask mit sechs textuellen (linke Seite) und symbolischen (rechte Seite) Anzeige-Elementen.

Die Aufgabe für die Probanden bestand darin zu entscheiden, ob in einer Menge gleichzeitig angezeigter Inhalte genau eine konkrete Ausprägung eines Elements (*Zielelement*) vorhanden oder nicht vorhanden ist. Dabei war das Zielelement mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% genau einmal vorhanden, ansonsten wurden lediglich Distraktoren angezeigt. Die Bedienung der Sekundäraufgabe, also das Feedback über die Entscheidung ob das gesuchte Element vorhanden war oder nicht, wurde über zwei Tasten auf dem Lenkrad vorgenommen. Dabei sollte die linke Taste gedrückt werden, wenn das Zielelement vorhanden war, die rechte, wenn das Zielelement nicht vorhanden war. Wurde eine Auswahl getroffen, so wurde der Sekundärtask für eine Sekunde ausgeblendet, um eine Refokussierung des Probanden auf die Fahraufgabe zu gewährleisten.

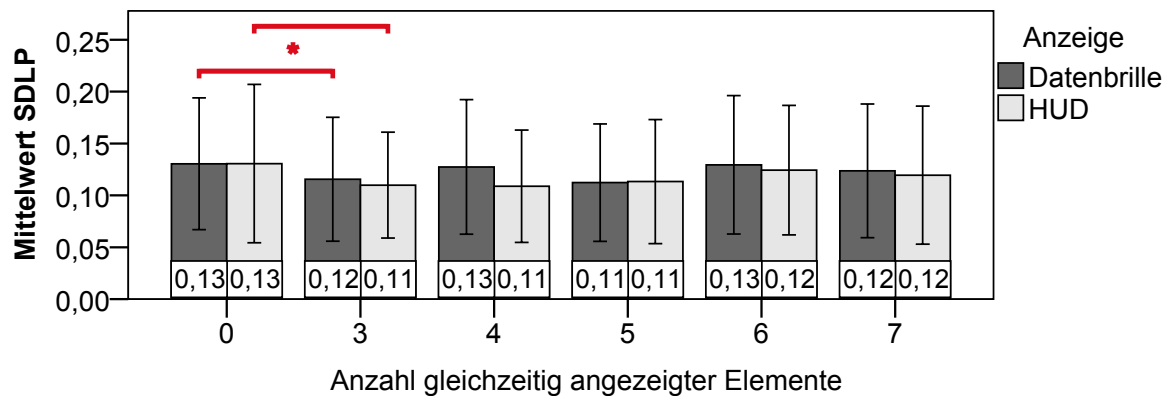
Als Zielelement für die symbolischen Inhalte diente der Linksabbiegepfeil. Als Distraktoren wurde das gleiche Symbol verwendet, welches jedoch durch Spiegelung und Rotation in unterschiedliche Richtungen zeigte (siehe Abbildung 4.13). Als Zielelement für die textuellen Inhalte diente das Wort „Hund“. Distraktoren waren in diesem Fall die Wörter Hand, Hemd und Herd (siehe Abbildung 4.13).

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Die Primäraufgabe der Versuchspersonen bestand darin, einem Vorderfahrzeug mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h und einem möglichst konstanten Abstand von 50 m auf der rechten Spur einer dreispurigen Autobahn zu folgen. Während der circa achtminütigen Fahrt wurden sechs Messabschnitte befahren, in denen die abhängigen Variablen SDLP und Standardabweichung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug gemessen wurden (siehe Kapitel 2.1.5). Während der gesamten Dauer eines Messabschnitts (eine Minute bei 100 km/h) wurde die in Abschnitt 4.2.3 beschriebene Sekundäraufgabe bearbeitet. Der Start eines Messabschnitts wurde dabei durch ein akustisches Signal angezeigt. Zwischen den Messabschnitten lagen jeweils Abschnitte mit einer Dauer von 20 Sekunden (bei Zielgeschwindigkeit), in denen keine Nebenaufgabe bearbeitet werden musste. In den sechs Messabschnitten wurde der Sekundärtask jeweils mit einer anderen Anzahl an Distraktoren bearbeitet. Die Gesamtzahl der angezeigten Elemente betrug dabei drei, vier, fünf, sechs oder sieben Elemente. Im verbliebenen Messabschnitt wurde überhaupt keine Nebenaufgabe bearbeitet, dieser diente als Vergleichsbedingung.

Nach einer Instruktionsphase und einer kurzen Eingewöhnungsfahrt, in der sich die Probanden an die Primäraufgabe und die Simulationsumgebung gewöhnen konnten, absolvierte jeder Proband insgesamt vier Messfahrten (Within-Subjects-Design). Bei zwei der Messfahrten wurde die Sekundäraufgabe dabei kopfstabil in der Datenbrille angezeigt, bei den anderen beiden Messfahrten entsprechend im HUD. Für jede Ausgabemodalität wurde eine Messfahrt mit ausschließlich symbolischen Inhalten durchgeführt, die andere mit textuellen Anzeigen. Die Reihenfolge der Ausgabemodalitäten und Inhaltsart wurde dabei abgewechselt, um Trainingseffekte zu vermeiden.

Nach jeder Messfahrt mussten die Probanden bestimmen, wie viele Informationselemente ihrer Meinung nach maximal in der jeweiligen Kombination aus Anzeigemodalität (HUD oder Datenbrille) und Inhaltskategorie (Symbole und Wörter) angezeigt werden sollten. Nach Beendigung aller Messfahrten wurden die Versuchspersonen gebeten, für verschiedene Kriterien eine Rangfolge der verschiedenen Systemkombinationen aus Anzeigemodalität und Inhaltskategorie zu bilden. Diese Kriterien umfassten die grundsätzliche Ablenkung von der Fahraufgabe, die visuelle und kognitive Beanspruchung, das Blickverhalten und -Dauer sowie Verdeckungseffekte.

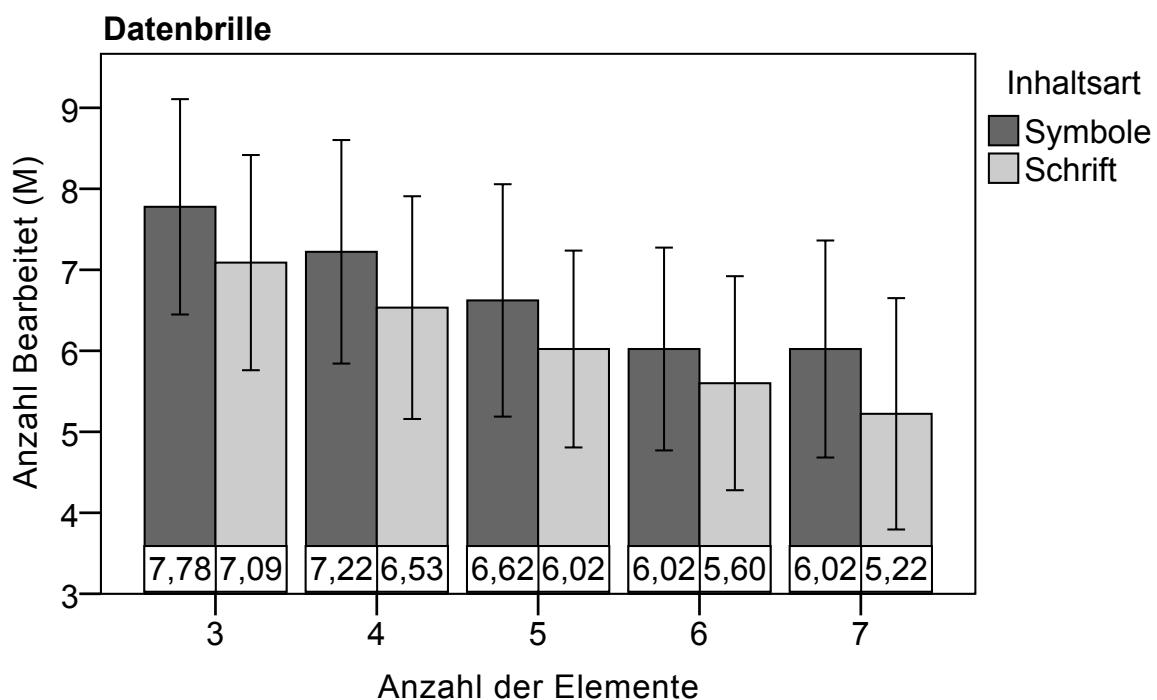
**Ergebnisse** Eine dreifaktorielle Anova zeigte einen signifikanten Einfluss der Anzahl der angezeigten Inhalte auf die SDLP-Werte ( $F=5,538$ ,  $p<0,05$ ). Mit entsprechend Bonferroni-korrigierten Post-Hoc Tests konnte allerdings entgegen der Annahmen keine systematische Verschlechterung der Fahrleistung festgestellt werden. Vielmehr wurde nur festgestellt, dass die Querführung für die Vergleichsfahrt (ohne Sekundäraufgabe) am schlechtesten bewältigt wurde (Abbildung 4.14). Sowohl bei Benutzung der Datenbrille ( $t=2,3$ ,  $p<0,05$ ) als auch mit dem HUD ( $t=2,2$ ,  $p<0,05$ ), waren die SDLP-Werte für die Vergleichsfahrt signifikant schlechter als mit drei simultan angezeigten symbolischen Elementen.



**Abbildung 4.14:** SDLP-Werte in Abhängigkeit der Anzahl der gleichzeitig angezeigten Inhalte und der Ausgabemodalität.

Die Art der angezeigten Inhalte und die Ausgabemodalität zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die Querführung. Die Standardabweichung des Abstands zum Vorderfahrzeug (SDD) wurde von keiner der unabhängigen Variablen signifikant beeinflusst.

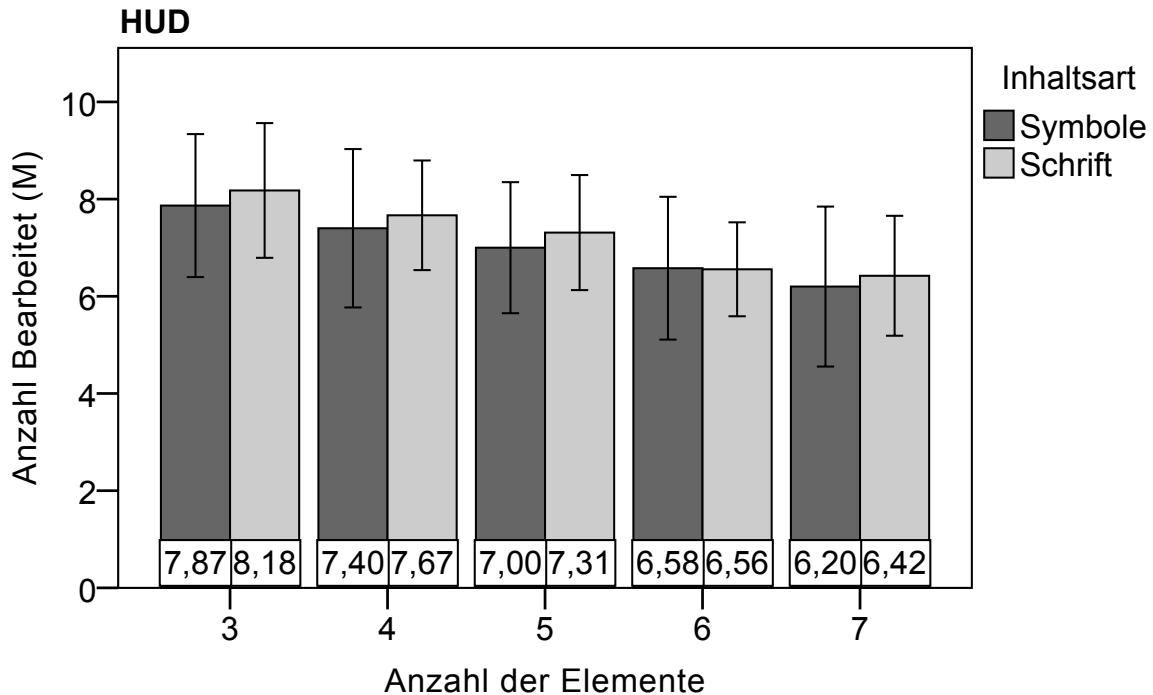
Betrachtet man die Leistungen der Probanden in der Sekundäraufgabe ergeben sich deutliche Effekte zwischen den Bedingungen (siehe Abbildungen 4.15 und 4.16).



**Abbildung 4.15:** Durchschnittliche Anzahl der bearbeiteten Aufgaben in Abhängigkeit der Menge und Art der angezeigten Inhalte für die Datenbrille.

Bei der Anzahl der bearbeiteten Aufgaben pro Streckenabschnitt konnte ein signifikanter Einfluss der Ausgabemodalität ( $F(1,44)=33,6$ ,  $p<0,05$ ) identifiziert werden. Generell konnten mehr Suchaufgaben bearbeitet werden, wenn diese im HUD angezeigt wurden ( $M=7,1$ ,  $SD=1,5$ ) als in der Datenbrille ( $M=6,4$ ,  $SD=1,5$ ). Auch der Einfluss der Inhaltsart

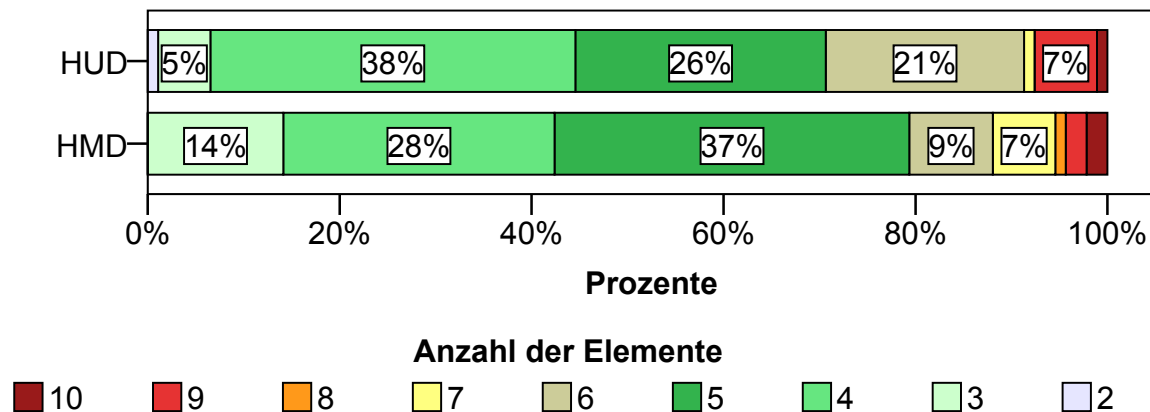
war auf diese abhängige Variable signifikant ( $F(1,44)=4,47$ ,  $p<0,05$ ). Wurden Symbole angezeigt, konnten mehr Aufgaben bearbeitet werden ( $M=6,9$ ,  $SD=1,6$ ), als bei der Anzeige von Text ( $M=6,7$ ,  $SD=1,5$ ). Hierbei ist allerdings zu beachten, dass auch ein Interaktionseffekt ( $F(1,44)=24,0$ ,  $p<0,05$ ) zwischen Inhaltsart und Ausgabemodalität festgestellt wurde.



**Abbildung 4.16:** Durchschnittliche Anzahl der bearbeiteten Aufgaben in Abhängigkeit der Menge und Art der angezeigten Inhalte für das HUD.

Der Unterschied zwischen der Bearbeitung von symbolischen ( $M=7,0$ ,  $SD=1,6$ ) und textuellen ( $M=7,2$ ,  $SD=1,4$ ) Inhalten war bei der Anzeige im HUD relativ gering. Bei der Anzeige in der Datenbrille hingegen, konnten deutlich mehr Aufgaben mit symbolischen Inhalten bearbeitet werden ( $M=6,7$ ,  $SD=1,5$ ) als mit textuellen ( $M=6,1$ ,  $SD=1,5$ ). Auch der Einfluss der Anzahl der gleichzeitig angezeigten Inhalte war in diesem Versuch signifikant ( $F(1,44)=415,73$ ,  $p<0,05$ ). So sinkt bei steigender Anzahl gleichzeitig angezeigter Elemente sowohl bei der Anzeige im HUD als auch in der Datenbrille die Leistung in der Suchaufgabe kontinuierlich.

Wesentlich eindeutiger als die Effekte der angezeigten Inhalte auf die Fahrleistung der Probanden, waren auch die subjektiven Einschätzungen der Versuchsteilnehmer (siehe Abbildung 4.17). Sowohl auf dem HUD als auch auf dem HMD sollte die Anzahl der gleichzeitig angezeigten Elemente, unabhängig davon ob es sich um Wörter oder Symbole handelt, nicht mehr als fünf betragen. Um Unterschiede zwischen den Anzeigemodalitäten zu bestimmen, wurden paarweise Wilcoxon-Tests durchgeführt. Tatsächlich können auf dem HUD ( $M=5,02$ ,  $SD=1,51$ ) signifikant mehr Inhalte gleichzeitig angezeigt werden als auf der Datenbrille ( $M=4,88$ ,  $SD=1,48$ ,  $p<0,05$ ). Da jedoch nur eine ganzzahlige Anzahl von Elementen angezeigt werden können, spielt dieser Unterschied in der Praxis nur eine geringe Rolle. Einen ähnlichen Unterschied gibt es innerhalb der Anzeigemodalität „HUD“: Hier können signifikant weniger Wörter ( $M=4,78$ ,  $SD=1,57$ ) als Icons ( $M=4,83$ ,  $SD=1,39$ ) angezeigt werden ( $p<0,05$ ).

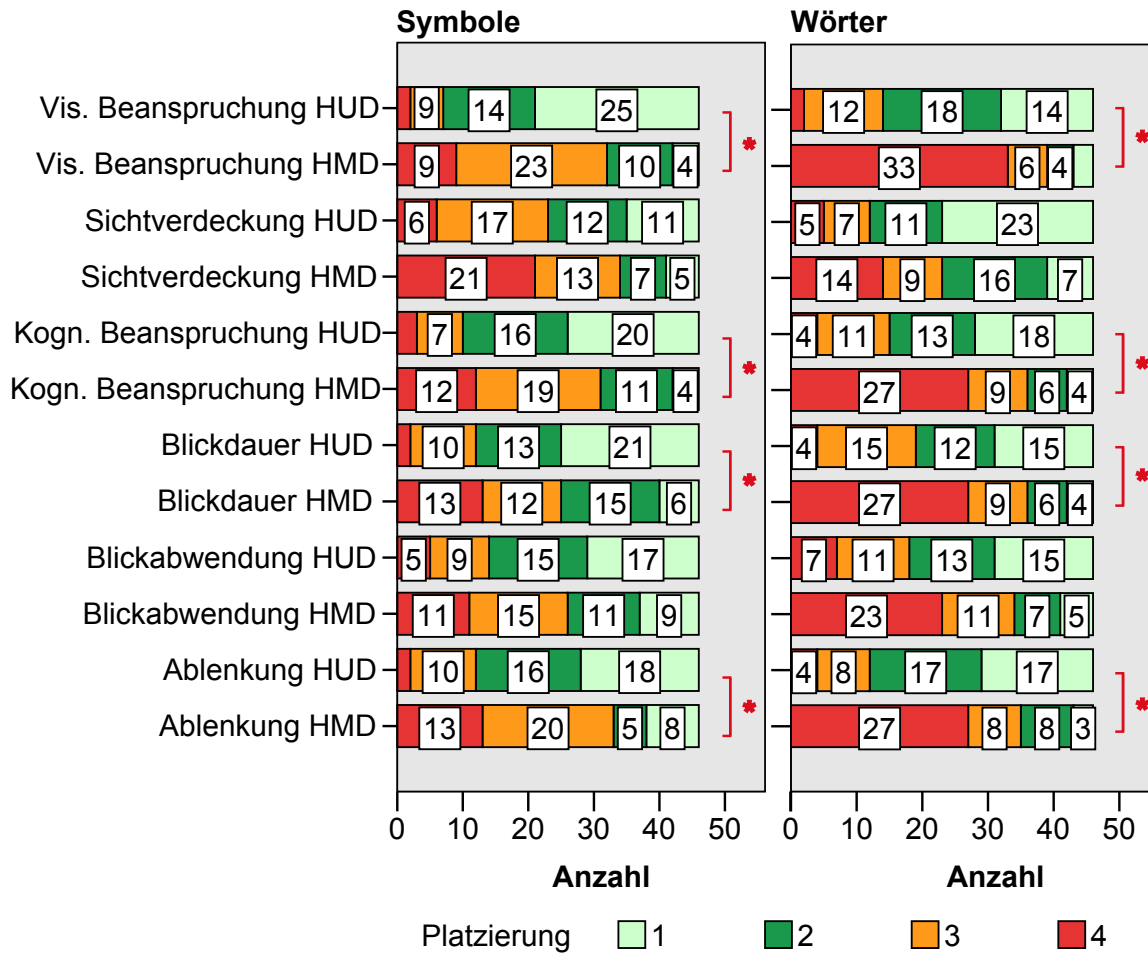


**Abbildung 4.17:** Nennungen der Probanden, wie viele Inhalte maximal gleichzeitig auf den verschiedenen Ausgabemodalitäten angezeigt werden dürfen.

Probanden wurden außerdem in den Fragebögen dazu aufgefordert, die erlebten Systemkombinationen (aus Ausgabemodalität und Art der angezeigten Inhalte) bezüglich verschiedener Kriterien in eine Rangfolge zu bringen. Über eine Multivariate Varianzanalyse wurde hier ein signifikanter Einfluss der Ausgabemodalität ( $F(6,40)=11,82$ ,  $p<0,05$ ) und der angezeigten Inhalte identifiziert ( $F(6,40)=3,47$ ,  $p<0,05$ ). Kontraste zeigten, dass sich die Ausgabemodalitäten hinsichtlich jedes Kriteriums signifikant unterscheiden ( $p<0,05$ ). Abbildung 4.18 zeigt für alle Systemkombinationen aus Ausgabemodalität und Inhaltsart die Rangfolgenverteilung durch die Probanden. Um weitere, abhängig von der Art der dargestellten Inhalte, signifikant unterschiedliche Systemvarianten zu identifizieren, wurden paarweise t-Tests durchgeführt. Nach einer Bonferroni-Adjustierung des  $\alpha$ -Niveaus auf  $\alpha = 0,002$ , ergaben sich lediglich bei den Kriterien Sichtverdeckung und Blickabwendung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen pro Inhaltsart.

**Diskussion** In dieser Untersuchung sollte die Anzahl der Elemente bestimmt werden, die maximal gleichzeitig angezeigt werden können ohne bereits spürbare Auswirkungen auf die Fahraufgabe zu haben. Hierzu wurde zunächst eine geeignete Nebenaufgabe entwickelt, die einerseits durch die Wahl der Inhalte relativ nah am automotiven Nutzungskontext liegt, andererseits jedoch abstrakt genug ist, um Rückschlüsse auf die generelle Nutzung von Symbolik oder Schrift ziehen zu können. Die Interaktion wurde so gestaltet, dass eine Auseinandersetzung mit den dargestellten Inhalten unvermeidlich, die Interaktion selbst aber so einfach wie möglich ist.

Im ausgewählten Fahr-Szenario konnten in dieser Studie keinerlei systematische Effekte durch die dargestellten Inhalte auf die Fahrleistung der Probanden identifiziert werden. Es besteht allerdings die Möglichkeit, dass ein solcher Effekt erst ab einer noch höheren Komplexität der Inhalte (mehr als sieben gleichzeitig dargestellte Elemente) auftritt. Der relativ homogene, subjektive Eindruck der Probanden, unabhängig von der Ausgabemodalität, nicht mehr als fünf Elemente gleichzeitig anzuzeigen, stellt den Nutzen einer solchen Komplexitätserhöhung allerdings in Frage. Die Wahl eines anspruchsvolleren Fahr Szenarios wäre vermutlich ein geeignetes Mittel, mit dem möglicherweise bestehende Effekte identifiziert werden können. Letztlich hat jedoch die Kombination aus visueller, motorischer und kognitiver Komplexität einer Aufgabe einen wesentlich größeren Einfluss auf die Ablenkung des Fahrers und somit seine Fahrleistung als ein isoliertes Kriterium wie



**Abbildung 4.18:** Rangfolgenbildung für die verschiedenen Kombinationen aus Ausgabemodalität und Inhaltsart. Paarweise signifikant unterschiedliche Bedingungen ( $p < 0,002$ ) sind mit einem (\*) markiert.

die Anzahl der gleichzeitig angezeigten Elemente. Mit der Untersuchung verschiedener Interaktionskonzepte soll diesem Gedanken in Kapitel 5 dieser Arbeit weiter nachgegangen werden.

Erwartungsgemäß steigt die Komplexität der Sekundäraufgabe mit einer höheren Anzahl gleichzeitig dargestellter Inhalte. Der Grund für die effektivere Aufgabenbearbeitung im HUD hängt vermutlich mit der besseren Ablesbarkeit der Inhalte zusammen. Hierauf deutet auch der signifikante Unterschied zwischen der Anzeige von Symbolen und Schrift bei der Datenbrille hin, welcher bei der Anzeige auf dem HUD nicht auftritt.

Es ist dennoch bemerkenswert, dass - trotz der prototypischen Qualität der Datenbrille - bei den Fahrdaten keine Unterschiede zwischen der (kopfstabilen) Anzeige von Inhalten auf der Datenbrille und der Präsentation auf dem HUD auftraten. Deutliche Unterschiede zwischen den beiden Ausgabemodalitäten offenbarten sich jedoch bei der subjektiven Einschätzung der Probanden bezüglich verschiedener wahrnehmungsspezifischer Kriterien, wie die durch die Anzeige erzeugte visuelle und kognitive Last sowie das Ablenkungspotenzial. Im Zusammenhang mit den Leistungen in der Sekundäraufgabe liegt der Verdacht nahe, dass die Anforderungen zwar steigen, die Durchführung der Primäraufgabe

jedoch weiterhin erfolgreich priorisiert werden kann. Auch wenn die Vermutung naheliegt, dass die beobachteten Effekte auch mit der schlechteren Anzeigequalität der Datenbrille zusammenhängen, besteht hier weiterer Forschungsbedarf. Insbesondere die Untersuchung eines möglichen Effekts der (technologieunabhängigen) Anzeigenstabilisierung sollte hier bei entsprechender technischer Reife der Anzeige- und Trackingverfahren durchgeführt werden.

Nach subjektiver Meinung der Probanden sollten nicht mehr als fünf Elemente gleichzeitig in der Datenbrille angezeigt werden. Allerdings konnten auch bis zu einer Gesamtzahl von sieben gleichzeitig angezeigten Elementen in einem Fahrsimulator-Experiment mit einem einfachen Fahrszenario keine negativen Effekte auf die Fahraufgabe festgestellt werden.

## 4.3 Warnungen auf dem HMD

Kapitel 4.3 basiert auf der Publikation: F. Lauber und A. Butz. In-your-face, yet unseen?: improving head-stabilized warnings to reduce reaction time. Erschienen in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, Seiten 3201–3204. ACM, 2014. [85]. Die Programmierung der für die Studien notwendigen Software wie auch die Konzeption, Durchführung und Auswertung der beiden Studien selbst wurde jeweils von Felix Lauber durchgeführt.

### 4.3.1 Motivation und Untersuchungsgegenstand

Kopfstabile Anzeigen befinden sich immer im Sichtfeld des Fahrers und zwar unabhängig von dessen Kopfdrehung. Ein Vorteil dieser Anzeigetechnik könnte sein, dass kritische Informationen schneller wahrgenommen werden können als mit fahrzeugstabilen Anzeigen, die nur im peripheren Sichtbereich des Fahrers liegen. Diese Vermutung wurde bereits erstmals in Kapitel 4.1 überprüft. Auch wenn die Probanden hier im Durchschnitt etwas schneller auf eine Anzeige reagieren konnten, so war dieser Effekt nicht signifikant. Dennoch bestand die Vermutung, dass es Situationen geben könnte, in denen die kopfstabile Anzeige von kritischer Information einen signifikanten Vorteil in der Reaktionszeit bewirkt.

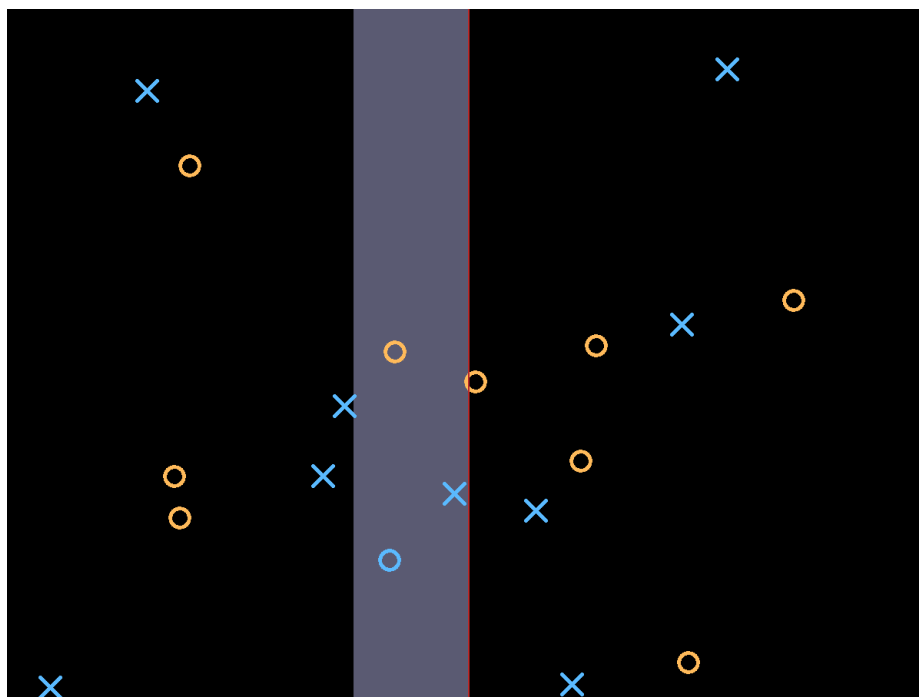
Eine solche Situation könnte beispielsweise eine entspannte Autobahnfahrt sein, in der der Fahrer intensiv mit der Durchführung einer Sekundäraufgabe beschäftigt ist. Da die Fahraufgabe den Fahrer hier sehr wenig beansprucht, können relativ viele Ressourcen für die Nebenbeschäftigung aufgewendet werden. Tritt während dieser Phase der intensiven Beschäftigung mit einer Nebenaufgabe trotzdem eine kritische Situation auf, so ist es umso wichtiger den Fahrer zu warnen und dessen ungeteilte Aufmerksamkeit möglichst schnell auf die Bewältigung dieser Situation zu lenken.

Den beiden folgenden Studien wird ein so geartetes Szenario zugrunde gelegt: ein visuell und motorisch stark abgelenkter Fahrer in einer relativ anspruchslosen Fahrsituation wird

mit einer kritischen Situation konfrontiert. Zu deren Bewältigung wird er entweder durch eine Warnung in der Datenbrille oder in einem Head-Up Display unterstützt. Letztlich soll die Frage beantwortet werden, ob und unter welchen Bedingungen eine kopfstabile Anzeige dieser Warnung einen Vorteil gegenüber der fahrzeugstabilen Anzeige im HUD bieten würde. Ob ein Vorteil besteht oder nicht, wird im Folgenden auf Basis der Reaktionszeiten entschieden.

### 4.3.2 Studie I

**Nebenaufgabe** Für die Untersuchung wurde der Surrogate Reference Task (SuRT) [103] ausgewählt. Der SuRT ist eine standardisierte Nebenaufgabe, die ein relativ starkes Maß an visuell-motorischer Ablenkung induzieren kann. Auf dem CID durchgeführt, kann damit eine intensive Nebenbeschäftigung mit einem beliebigen Infotainment-System nachempfunden werden.



**Abbildung 4.19:** Bildschirminhalt bei der SuRT-Nebenaufgabe. Der hellgraue Selektionsbereich muss über das Zielelement (in diesem Falle ein blauer Kreis) bewegt werden.

In der für die folgenden Versuche gewählten Variante erscheinen auf einer dunklen Fläche genau 18 farbige Symbole (Abbildung 4.19). Die Hälfte dieser zufällig angeordneten Symbole sind Kreise, die andere Hälfte sind diagonal gekreuzte Linien. Den Symbolen wird dabei jeweils eine einheitliche Farbe gegeben, in diesem Fall erschienen Kreise immer in der Farbe Blau, die Kreuze dagegen in der Farbe Rot. Ein Symbol (Zielsymbol) erscheint jedoch in der Farbe der jeweils anderen Symbolgruppe, also beispielsweise ein blaues Kreuz oder ein roter Kreis, während die übrigen Symbole (Distraktoren) den beschriebenen Gesetzmäßigkeiten folgen. Ein weiteres Element, das auf dem Bildschirm an-



gezeigt wird ist ein vertikal verlaufender, hellgrauer Balken, der in der Breite genau ein Achtel des horizontal verfügbaren Raumes bedeckt.

Die Aufgabe des Probanden ist es, diesen Balken (Selektionsbereich) in horizontale Richtung so zu bewegen, dass er das Zielsymbol überdeckt und dann zu bestätigen. Als Eingabegerät wird hierzu in der folgenden Untersuchung ein Dreh-Drücksteller verwendet. Die horizontale Bewegung des grauen Bereichs wird durch Drehen des ZBE erreicht, ein Druck auf das ZBE bedeutet die aktuelle Auswahl zu bestätigen. Wurde eine Auswahl bestätigt, so arrangieren sich die Symbole auf dem Bildschirm neu und das Zielsymbol muss erneut gefunden und ausgewählt werden. Sowohl das Arrangement der Symbole als auch die Auswahl des Zielsymbols erfolgen dabei zufällig. Der graue Selektionsbereich wird erst sichtbar, sobald das ZBE in eine beliebige Richtung gedreht wurde, je nach Drehrichtung links oder rechts vom Zentrum des Bildschirms.

**Aufbau** Die Studie wurde in dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen „Usability Lab“ durchgeführt. Die im gleichen Kapitel beschriebene Sitzkiste wurde mit dem liegenden HUD-Aufbau (Spiegelung eines vor dem Fahrer befestigten Displays) betrieben. Als Datenbrille kam wiederum die LUMUS DK-32 zum Einsatz (siehe Kapitel 3.3.3). Die Helligkeit und Auflösung der beiden Ausgabemodalitäten wurden angeglichen.

**Stichprobe** An der Studie nahmen insgesamt 25 Versuchspersonen teil, davon waren fünf weiblich und 20 männlich. Das Alter der Probanden lag zwischen 21 und 59 Jahren ( $M=34,4$ ,  $SD=11,0$ ). Sechs Probanden gaben an im Alltag eine Brille zu tragen, was während des Versuchs durch das Tragen von Kontaktlinsen kompensiert wurde.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Nach einer kurzen Eingewöhnungsfahrt, einer genauen Instruktion und dem Erfassen demographischer Daten, absolvierte jede Versuchsperson zwei Fahrten (Within-Subjects Design). Die Fahraufgabe bestand darin, einem Vorderfahrzeug auf einem geraden Autobahnabschnitt zu folgen. Dabei sollten die Probanden möglichst genau 100 km/h fahren, der Abstand zum Vorderfahrzeug wurde jedoch von der Simulation unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit bei 50 m gehalten.

Zu Beginn jeder Fahrt nahmen die Probanden zunächst die Zielposition hinter dem Vorderfahrzeug ein und beschleunigten auf etwa 100 km/h. Nach genau 2 Minuten wurde durch ein akustisches Signal der Start der ersten Phase der Beschäftigung mit der Nebenaufgabe signalisiert. Probanden wurden instruiert, so gut wie möglich zu fahren (Primäraufgabe) aber dennoch zu versuchen die Sekundäraufgabe mit maximaler Geschwindigkeit und Präzision zu bearbeiten. Nach etwa 3 Minuten wurde durch den Versuchsleiter manuell eine kritische Situation ausgelöst. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Proband zu dem Zeitpunkt des Auslösens auch wirklich seine volle Konzentration der Nebenaufgabe widmete. Die kritische Situation bestand darin, dass das Vorderfahrzeug ein unvorhergesehenes Bremsmanöver bis zum Stillstand durchführte. Den Probanden wurde gleichzeitig eine von zwei Warnungen mit unterschiedlichem Aufforderungscharakter angezeigt, entweder eine Bremsaufforderung oder eine Ausweichempfehlung (siehe Abbildung 4.20).

Unabhängig von der Ausgabemodalität bedeckte die Warnung  $5,4^\circ$  des Sichtfelds des Probanden. Die Warnungen wurden in beiden Fällen im Zentrum des jeweiligen Ausgabemediums angezeigt, da frühere Arbeiten diese Position als vorteilhaft identifiziert hatten [171, 181].



**Abbildung 4.20:** Die in der Datenbrille bzw. im HUD angezeigte Ausweichempfehlung (links) und Bremsaufforderung (rechts).

Die Probanden wurden zuvor instruiert bei der Bremsaufforderung lediglich so schnell und so hart wie möglich zu bremsen. Die Instruktion bei der Ausweichempfehlung war, dass zwar auch gleichzeitig gebremst werden darf, es jedoch entscheidend ist, so schnell wie möglich auf die linke Spur zu wechseln. Dabei wurden die Probanden darauf hingewiesen, dass der hierzu eigentlich notwendige Schulter- oder Spiegelblick entfallen könne.

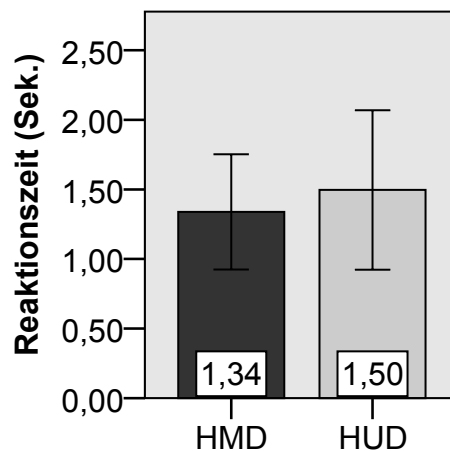
Diese Sequenz aus zwei Minuten Fahrt, drei Minuten Fahrt bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe und anschließender Konfrontation mit der kritischen Situation wurde noch zwei weitere Male durchgeführt. Die Reihenfolge der Brems- beziehungsweise Ausweichaufforderung wurde dabei permutiert. In die Datenauswertung flossen allerdings nur die ersten beiden Situationen ein, die dritte Konfrontation diente lediglich als Distraktor, um die Reihenfolge der Warmaufforderungen nicht offensichtlich zu machen.

Nach Beendigung aller Fahrten wurden die Probanden gebeten einen kurzen Fragebogen auszufüllen, in dem sie in drei Kategorien ihre Präferenz bezüglich einer Ausgabemodalität darlegen konnten. Diese drei Kategorien bestanden darin, wie schnell sie auf die Warnung aufmerksam wurden, wie lange sie für eine Entscheidung über die auszuführende Aktion (ausweichen oder bremsen) benötigten und wie schnell sie letztlich die kritische Situation meistern konnten. Bei jeder Kategorie waren die Antwortmöglichkeiten „HUD“, „Datenbrille“ und „kein Unterschied“ vorgegeben. Zuletzt wurden sie aufgefordert, ihre Entscheidung zu begründen.

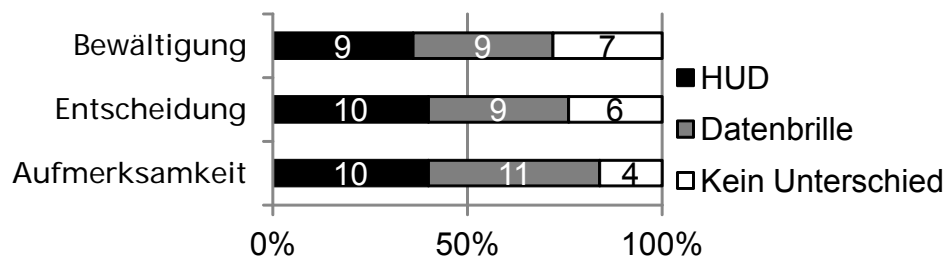
**Ergebnisse** Die Reaktionszeiten der Probanden wurden ab dem Warnzeitpunkt gemessen. Eine Reaktion wurde festgestellt, sobald die gemessene Bremskraft einen Wert größer als Null (Bremsaufforderung) oder der Lenkeinschlag nach links einen Wert größer als  $10^\circ$  annahm (Ausweichempfehlung).

Die resultierenden Reaktionszeiten wurden mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse untersucht. Auch wenn die mittlere Reaktionszeit etwas geringer ausfiel, wenn Probanden die Warnung auf der Datenbrille angezeigt bekamen (siehe Abbildung 4.21), so hatte jedoch weder der Faktor „Warnungstyp“ noch der Faktor „Ausgabemodalität“ einen signifikanten Einfluss auf die Reaktionszeiten.

Auch die Ergebnisse der subjektiven Einschätzung der Probanden, in der sie in den drei Kategorien „Aufmerksamkeit“, „Entscheidung“ und „Bewältigung der Situation“ jeweils entscheiden konnten, welche Ausgabemodalität jeweils zu Vorteilen führte, war sehr ausgeglichen (Abbildung 4.22). Ein entsprechender  $\chi^2$ -Test offenbarte in keiner der Kategorien signifikante Unterschiede zwischen den Ausgabemodalitäten.



**Abbildung 4.21:** Durchschnittliche Reaktionszeiten beim Anzeigen der Warnung auf der Datenbrille (HMD) und dem HUD.



**Abbildung 4.22:** Im Abschlussfragebogen wurden Probanden nach ihrer bevorzugten Ausgabemodalität in drei Kategorien befragt. In allen Kategorien war das Antwortverhalten sehr ausgeglichen.

Bei der Auswertung der Freitextfelder, die die Versuchspersonen dazu nutzen konnten ihre Wahl zu begründen, fiel zunächst auf, dass fünf Probanden ein zusätzliches akustisches Signal forderten. Eine Versuchsperson erklärte außerdem, dass sie die Warnung in der Datenbrille bei gleichzeitiger Bearbeitung der Nebenaufgabe nicht gut wahrnehmen konnte. Ihrer Aussage nach fühle es sich so an, als erscheine die Warnung - obwohl tatsächlich unmittelbar im zentralen Blickfeld positioniert - „...irgendwo im Raum...“.

**Diskussion** In dieser Studie wurden zwei Warnungen, die jeweils eine unterschiedliche Reaktion erforderten, entweder auf einem HUD oder in der Datenbrille angezeigt. Dabei befanden sich die Probanden in einer Situation, in der eine relativ anspruchslose Primäraufgabe (Folgefahrt auf gerader Strecke) mit einer visuell und motorisch sehr fordernden Sekundäraufgabe kombiniert wurden. Beim Vergleich der Reaktionszeiten konnte weder ein signifikanter Einfluss der Ausgabemodalität noch des Warnungstyps identifiziert werden. Auch die Auswertung der subjektiven Antworten bestätigen, dass sich in diesem Szenario kein Vorteil kopfstabiler Anzeigen feststellen lässt.

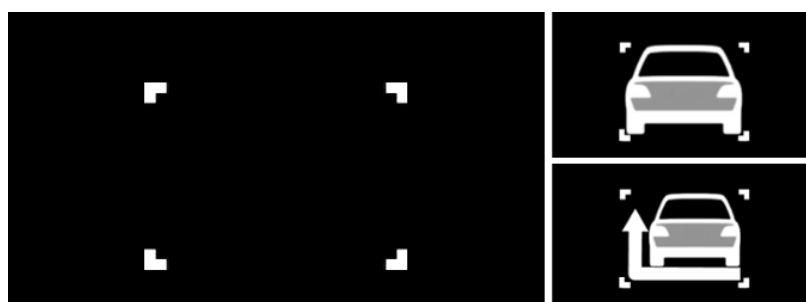
Es wurde vor dem Versuch zwar bereits vermutet, dass der für die Wahrnehmung von Licht und Bewegung der empfindliche periphere Sichtbereich des Menschen sehr gut in der Lage sein würde, festzustellen, ob auf dem HUD eine Warnung dargestellt wird, da hierbei lediglich die bloße Feststellung der An- beziehungsweise Abwesenheit eines Lichtreizes

notwendig ist. Wird die Warnung auf der Datenbrille und damit von vornherein näher am fovealen Sichtbereich angezeigt, sollte eigentlich mehr Zeit für die bewusste Verarbeitung und Interpretation der geforderten Reaktion bleiben. Daher wurde vermutet, dass selbst *wenn* die periphere Wahrnehmung der fovealen hier ebenbürtig wäre, sich dies in der Häufigkeit der nicht korrekt interpretierten Warnungen widerspiegeln würde. Da dies jedoch nicht der Fall war, muss ein weiterer Faktor die Wahrnehmung und Interpretation der Warnung in der Datenbrille verlangsamen.

Die Kommentare der Probanden deuten zunächst lediglich darauf hin, dass die Anzeige kritischer Information durch eine zusätzliche, akustische Warnung verbessert werden sollte. Dies ist eine offensichtliche Ergänzung auf die jedoch bewusst verzichtet wurde, um den Vergleich zwischen den Reaktionen auf die visuellen Reize nicht zu verfälschen. Der Kommentar, die Warnung in der Datenbrille wirke als ob sie „irgendwo im Raum“ erscheine, deutet auf ein weiteres Problem hin. Da die Projektionstiefe der verwendeten Datenbrille etwa drei Meter beträgt, die Nebenaufgabe jedoch in einer Distanz von etwa 70 cm bearbeitet wurde, waren die Probanden bei dem Erscheinen der Warnung auf eine andere Ebene fokussiert. Dadurch ist es möglicherweise zu *inattentional blindness* (siehe Kapitel 2.1.2) gekommen, was die Reaktion auf die Warnung verzögert hat. Die Verwendung einer Datenbrille mit geringerer Projektionstiefe wäre eine Möglichkeit diesen Effekt in einem Folgeversuch weiter zu untersuchen. Alternativ könnte man jedoch auch eine Lösung erarbeiten, die das Problem auf Basis eines veränderten Anzeigeconzepts abmildert oder umgeht. An diesem Punkt setzt die folgende Untersuchung an.

### 4.3.3 Studie II

Die erste Untersuchung wurde nochmals durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse im ersten Teil der Untersuchung wurde jedoch die Anzeige der Warnungen modifiziert.



**Abbildung 4.23:** Im zweiten Versuch wird zusätzlich zur Warnung eine rechteckige Markierung angezeigt. Diese ist auch sichtbar wenn keine Warnung angezeigt wird (linke Seite) und markiert genau den Bereich, in dem eine Warnung erscheinen kann (rechte Seite).

Während in der ersten Untersuchung entweder überhaupt nichts oder die entsprechende Warnung angezeigt wurde, so wird nun der Bereich in dem die Warnung erscheint durch eine ständig vorhandene rechteckige Markierung gekennzeichnet (siehe Abbildung 4.23).

Diese Markierung soll den Probanden einen visuellen Referenzpunkt geben, um sie bei der Fokussierung von Inhalten in der Datenbrille zu unterstützen. Es wird erwartet, dass es den

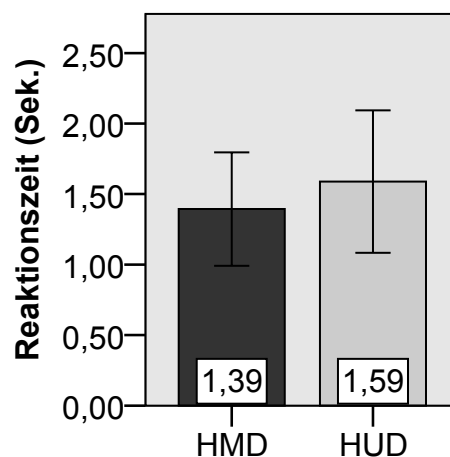
Probanden so schneller gelingt, die Warnung in der Datenbrille wahrzunehmen und adäquat zu reagieren. Für den folgenden Versuch wurden alle Visualisierungen angepasst, das heißt die rechteckige Markierung war sowohl auf dem HUD als auch auf der Datenbrille zu sehen.

**Aufbau** Der Studienaufbau war ansonsten identisch zum ersten Teil der Untersuchung.

**Stichprobe** Insgesamt 26 Probanden nahmen an dem zweiten Versuch teil. Keine der Versuchspersonen hatte bereits an dem ersten Teil der Studie teilgenommen. Drei Studienteilnehmer waren weiblich, 23 waren männlich. Das Alter der Probanden lag zwischen 25 und 57 Jahren ( $M=35,4$ ,  $SD=9,8$ ). Insgesamt 10 Studienteilnehmer litten an einer Sehschwäche, die während des Versuchs durch das Tragen von Kontaktlinsen korrigiert wurde.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Probanden wurden analog zum ersten Teil der Untersuchung instruiert. Der Versuchsablauf, die Fragebögen, das Fahrscenario und die Reihenfolge und Art der Warnsituationen waren identisch. Die einzige Änderung zum ersten Versuchsteil bestand in der zusätzlichen Anzeige der Rechteckigen Markierung um den Bereich der (potenziell angezeigten) Warnung. Die Probanden wurden während der Instruktionsphase über die Bedeutung der Markierung aufgeklärt.

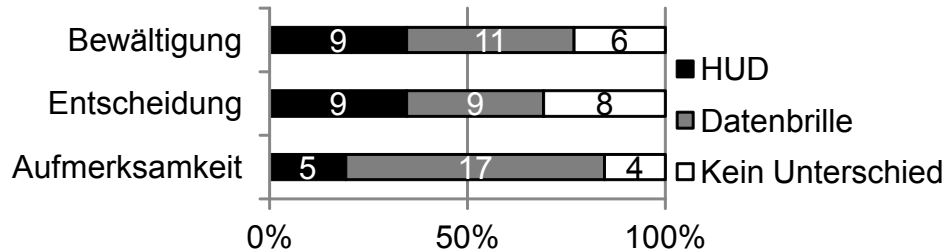
**Ergebnisse** Die gemessenen Reaktionszeiten wurden abermals einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) unterzogen. Von den 104 Messpunkten mussten für diese Analyse insgesamt 16 Werte ausgeschlossen werden. Vier Datenpunkte wurden von der Analyse ausgeschlossen, da sie mit zwei Standardabweichungen über dem Mittelwert als Ausreißer klassifiziert wurden. Bei weiteren 12 Datenpunkten konnte wegen technischer Probleme mit der Datenbrille von keiner exakten Messung ausgegangen werden.



**Abbildung 4.24:** Durchschnittliche Reaktionszeiten beim Anzeigen der Warnung auf der Datenbrille (HMD) und dem HUD im zweiten Versuch. Der Unterschied der Reaktionszeiten ist signifikant.

Die verbleibenden Datenpunkte verstießen weder gegen die Normalverteilungsvoraussetzung (Kolmogorov-Smirnoff-Test nicht signifikant), noch gegen die Voraussetzung der Varianzhomogenität (Levene-Test mit  $F(3,84)=2,52$ ,  $p>0,05$ ). Während der Warnungstyp erneut keinen signifikanten Einfluss auf die Reaktionszeiten hatte, reagierten bei dieser Untersuchung die Probanden signifikant schneller ( $F(1,84)=3,96$ ,  $p<0,05$ ) auf die Warnungen

wenn sie auf der Datenbrille angezeigt wurden als bei der vergleichbaren Darstellung auf dem HUD (siehe Abbildung 4.24).



**Abbildung 4.25:** Im Abschlussfragebogen wurden Probanden erneut nach ihrer bevorzugten Ausgabemodalität in drei Kategorien befragt. Der Unterschied in der Kategorie Aufmerksamkeit ist signifikant ( $p < 0,05$ ).

Bei der Frage, welche Ausgabemodalität die Aufmerksamkeit des Fahrers am schnellsten auf die Warnung lenkt, entschieden sich jetzt 65,3% der Probanden für die Datenbrille (Abbildung 4.25). Auch der entsprechende  $\chi^2$ -Test war für diese Kategorie signifikant ( $\chi^2(2) = 12,1, p < 0,05$ ).

#### 4.3.4 Zusammenfassung und Diskussion

Nachdem in einem ersten Vergleich der Reaktionszeiten auf Warnungen keine Unterschiede zwischen einer Anzeige auf dem HUD und der auf einer Datenbrille festgestellt werden konnten, wurde die Visualisierung leicht angepasst. Nach der bloßen Zugabe einer zusätzlichen, ständig sichtbaren, visuellen Referenz in Form einer rechteckigen Markierung unterschieden sich die Bedingungen in einer Wiederholung des Versuchs wesentlich deutlicher voneinander. Im Vergleich zur Darstellung im HUD reagierten Probanden nun signifikant schneller auf die Warnungen, wenn diese in der Datenbrille angezeigt wurden.

Auch wenn die Hinzunahme der Markierung die einzige Veränderung zwischen den beiden Versuchsdesigns war, so erlauben es die Ergebnisse aus den beiden Untersuchungen nicht hier eine Kausalität festzustellen. Um zu zeigen, dass die Markierung tatsächlich für den nun existierenden signifikanten Unterschied in den Reaktionszeiten verantwortlich sind, wäre ein neuer Versuch notwendig, der gezielt Warnungen mit und ohne visueller Referenz vergleicht.

Auch wenn die Reaktionszeiten bei der Darstellung in der Datenbrille signifikant kürzer waren: der nominelle Unterschied lag bei lediglich 0,2 Sekunden und war somit minimal. Hier ist außerdem anzumerken, dass dieser Unterschied bei Hinzunahme einer ergänzenden akustischen Warnung vermutlich vollständig verschwinden würde. Dennoch ist es interessant, dass die Wahrnehmung von rein visuellen Inhalten in einer Datenbrille unter bestimmten Voraussetzungen grundsätzlich schneller geschieht, auch weil komplexere Informationen (wie eine Reaktionsempfehlung) visuell deutlich effektiver codiert werden können als beispielsweise durch unterschiedliche akustische Signale. Daher leisten diese beiden Untersuchungen einen interessanten Beitrag für das Verständnis der Informationsanzeige in einer Datenbrille und öffnen interessante Forschungsfelder für zukünftige Arbeiten. Hier

gilt es besonders konzeptionelle Charakteristika wie die Stabilisierung von Inhalten von technischen Ausprägungen verschiedener Datenbrillen, wie die Projektionstiefe der Inhalte und die Qualität der Darstellung, zu trennen.

Sollte sich der Verdacht erhärten, dass Fokusprobleme in der Datenbrille durch eine bessere visuelle Führung kompensiert werden können, so hätte dies möglicherweise direkte Implikationen für die Entwicklung von Anzeige Konzepten für Datenbrillen. So könnten beispielsweise Inhalte, die ständig angezeigt werden (wie etwa die aktuelle Geschwindigkeit) als visuelle Referenz für Inhalte dienen, die nicht ständig angezeigt werden, aber möglicherweise trotzdem eine hohe Kritikalität besitzen (wie etwa Warnungen). Das richtige Arrangement der kombinierten Anzeigen würde dann möglicherweise zu einer optimalen Wahrnehmung aller angezeigten Inhalte beitragen.

Überraschenderweise bewirkt die kopfstabile Anzeige von Warnungen in der Datenbrille zunächst keine signifikant verkürzten Reaktionszeiten im Vergleich zur Anzeige in einem HUD. Nach Hinzunahme eines zusätzlichen grafischen Elements, das als visuelle Referenz diente, reagierten Probanden in einem zweiten Experiment jedoch signifikant schneller wenn Warnungen auf der Datenbrille anstatt auf dem HUD angezeigt wurden.

## 4.4 Kopfdrehung als Situationsindikator

Das dem Kapitel 4.4 zugrundeliegende Konzept, die Kopfbewegung des Fahrers für die Umstrukturierung der Inhalte auf der Datenbrille zu verwenden, basiert auf der Publikation: F. Lauber und A. Butz. View Management for Driver Assistance in an HMD. Erschienen in *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Seiten 1–6. IEEE, 2013. [86] Das Konzept entstand während der Durchführung und Auswertung des in Kapitel 4.1 beschriebenen Versuchs und stammt von Felix Lauber.

Die Ausarbeitung der Konzeptvarianten, die Durchführung der beiden Studien, sowie Teile deren Auswertung wurden im Rahmen der Bachelorarbeit: „Konzeption, Umsetzung und Evaluierung eines neuartigen Anzeige konzepts für das Automobil“ umgesetzt. Die Bachelorarbeit wurde angefertigt von Sophia Cook (2014). Themenstellung und die Betreuung der Arbeit wurde von Felix Lauber geleistet. Die Konzeptvarianten und die Ergebnisse der beiden Studien wurden veröffentlicht in: F. Lauber, S. Cook und A. Butz. Content Destabilization for Head-Mounted Displays. Erschienen in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, Seiten 2139–2142, ACM, 2015 [87].

### 4.4.1 Motivation

Zwei Überlegungen spielten bei den folgenden Konzepten eine entscheidende Rolle. Zunächst wurde in der Versuchsreihe zur optimalen Positionierung der Anzeigen bei kopf-

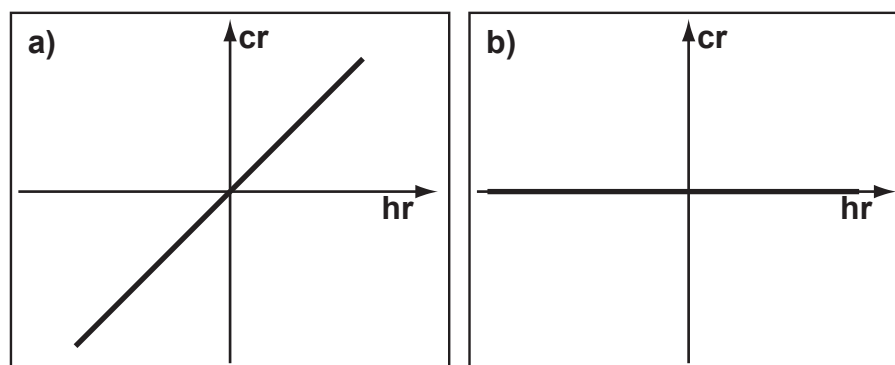
stabilen Inhalten in der Datenbrille festgestellt, dass der Kompromiss zwischen geringer Blickabwendung und der Gefahr der Überdeckung von Objekten aus der Umgebung nicht für alle Menschen optimal auflösbar ist (siehe Kapitel 4.2). So bevorzugten die Probanden vollkommen unterschiedliche Anzeigepositionen und nahmen dabei zum Wohle eines anderen Kriteriums oft eine für sie vertretbare Verdeckung in Kauf.

Dieses Problem der möglichen Verdeckung von Elementen der Umgebung des Fahrers wurde auch im Kapitel 4.1 als entscheidender Nachteil von kopfstabilen Anzeigen identifiziert. Die aus der klassischen Augmented Reality bekannten alternativen Stabilisierungsformen sind allerdings heutzutage wegen technischer Rahmenbedingungen nicht überzeugend umzusetzen: ein zu kleiner Anzeigebereich und statische sowie dynamische Tracking-Fehler sorgen für eine Anzeige, die von den Nutzern nicht akzeptiert wird und durch die hohe und gleichzeitig unnatürliche Dynamik vermutlich auch ein hohes Ablenkungspotenzial besitzt. Dennoch treten hier die angesprochenen Verdeckungseffekte in sehr viel geringerem Maße auf, da sich die Inhalte nach einer entsprechenden Kopfdrehung nicht mehr im Blickfeld des Nutzers befinden.

In den folgenden Konzepten wird das Ziel verfolgt eine Anzeige in der Datenbrille zu konzipieren, die keine der Nachteile der beiden etablierten Stabilisierungsformen mehr besitzt aber möglichst die Vorteile von beiden in sich vereint. Dabei werden Inhalte zunächst kopfstabil angezeigt, deren Erscheinung jedoch - ähnlich zu fahrzeugstabilen Anzeigen - abhängig von der Kopfdrehung des Nutzers verändert.

#### 4.4.2 Konzept

Betrachtet man fahrzeugstabile Anzeigen aus einer rein technischen Sichtweise, so können diese dadurch realisiert werden, dass eine virtuelle Kamera aus der Perspektive des Fahrers auf relativ zum Fahrzeug positionierte Inhalte gerichtet ist.



**Abbildung 4.26:** Fahrzeugstabile (linke Seite) und kopfstabile (rechte Seite) Inhalte ausgedrückt durch die Rotation einer virtuellen Szenenkamera (cr) in Abhängigkeit der Rotation des Kopfes (hr) um die gleiche Achse.

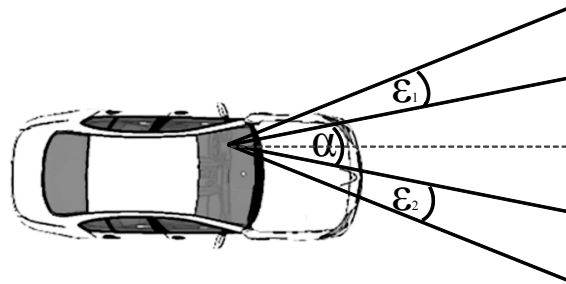
Bewegt der Nutzer nun seinen Kopf wird diese Änderung der Kopfposition in den sechs Freiheitsgraden linear auf eine Änderung der Kameraposition übersetzt. Abbildung 4.26 zeigt die entsprechenden Funktionsgraphen für kopf- und fahrzeugstabile Anzeigen beispielhaft für eine Rotationsachse.



Dabei wird die Kopfdrehung durch eine lineare Funktion in eine entsprechende Kameraposition übersetzt. Diese Funktion, die eine Kopfdrehung ( $hr$ ) als Parameter besitzt und auf eine entsprechende Kamerarotation ( $cr$ ) abbildet, kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$f(hr) = cr \quad (4.1)$$

In den im Folgenden vorgestellten Konzepten werden drei alternative Übersetzungsfunktionen dazu vorgestellt und am Beispiel der Rotation um die y-Achse (parallel zur Halswirbelsäule) implementiert und evaluiert.



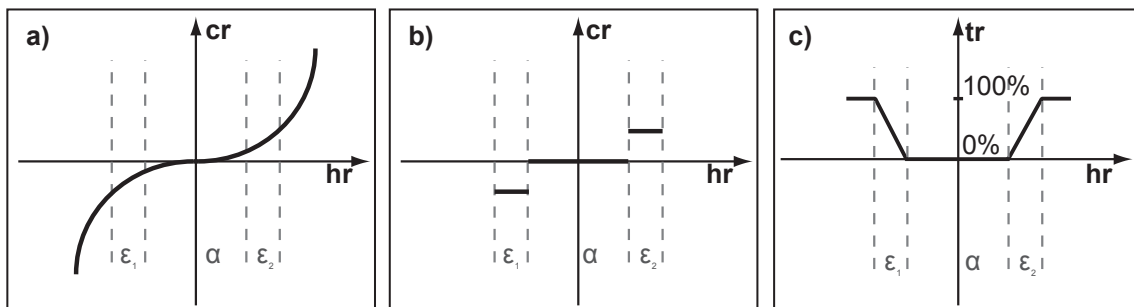
**Abbildung 4.27:** Die Aufteilung des Sichtfelds in Zonen.

Die Grundidee ist dabei zunächst das Blickfeld des Fahrers in drei Zonen aufzuteilen (siehe auch Abbildung 4.27). Blickt der Fahrer geradeaus (Zone  $\alpha$  in Abbildung 4.27), so werden Inhalte in der Datenbrille kopfstabil angezeigt. Dreht der Fahrer seinen Kopf nach rechts oder links (Zonen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  in Abbildung 4.27), so betritt er zunächst eine Transitionszone, in der Inhalte entsprechend des Konzepts verändert werden. Wird der Kopf weiter über diesen Bereich hinaus gedreht, verschwinden die Inhalte schließlich komplett, so wie es auch bei fahrzeugstabilen Anzeigen der Fall wäre.

**Blickverhalten im Fahrzeug** Ziel des Konzepts ist, den Fahrer während der entspannten Geradeausfahrt durch entsprechende Anzeigen auf der Datenbrille zu unterstützen. In Situationen, in denen die Anzeigen nicht benötigt werden, sollen die Anzeigen auch nicht das Sichtfeld des Fahrers unnötig füllen. Aus den Kopfbewegungsdaten, die für eine Studie [100] von Martin et al. gesammelt wurden, wird der Kopf während der Fahrt für 95% der Zeit nicht mehr als  $18^\circ$  nach rechts oder links gedreht [101]. Dies deckt sich mit einer Studie von Kimura et al., in der festgestellt wird, dass die Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrer seine Aufmerksamkeit nicht mehr nach vorne gerichtet hat, drastisch sinkt, wenn der Rotationswinkel des Kopfes mehr als  $15^\circ$  nach rechts oder links beträgt [74]. Aus diesen Daten wurde die Größe der ersten Blickzone abgeleitet. Der Bereich  $\alpha$  (siehe Abbildung 4.27) beträgt  $15^\circ$  nach links und rechts und definiert den Bereich, in dem angenommen wird, dass Fahrer entspannt nach vorne blicken und unterstützende Informationen in der Datenbrille wünschen. Die Größe dieser ersten Zone entspricht weiterhin den Ergebnissen der Grundlagenforschung über menschliches Blickverhalten, wie sie von Zangenmeister et al. durchgeführt wurde: besonders in Situationen, in denen die Position des Blickziels vorhersehbar ist, wird ein Sichtfeld von  $15^\circ$  nach links und rechts mit Augensakkaden abgedeckt [185]. Erst bei einer größerer Entfernung des Blickziels vom Zentrum der Sichtachse beginnt der Mensch den Kopf nachzudrehen.

Es gibt jedoch auch Fahrsituationen in denen der Fahrer typischerweise seinen Blick nicht nach vorne richtet. Führt er beispielsweise einen Spurwechsel durch (mit Schulterblick) oder ein rückwärtiges Parkmanöver, so muss er zwangsweise seinen Kopf drehen. Doch selbst für den Blick in den Seitenspiegel werden üblicherweise Kopfdrehungen durchgeführt [33], wie auch bei der Durchführung von Abbiegemanövern [93]. In diesen Situationen sollen überhaupt keine Inhalte angezeigt werden. Dazwischen wurden zwei Bereiche  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  eingeführt (siehe Abbildung 4.27). Sie dienen dazu, die notwendige Transition zwischen ein- und ausgeblendeten Zuständen umzusetzen. So werden die Inhalte in den Grenzbereichen zwar noch angezeigt und können bei Bedarf auch noch abgelesen werden, besitzen aber nicht mehr dieselbe Aufdringlichkeit wie in der Zone  $\alpha$ . Der hierfür verwendete Bereich beträgt jeweils  $10^\circ$ .

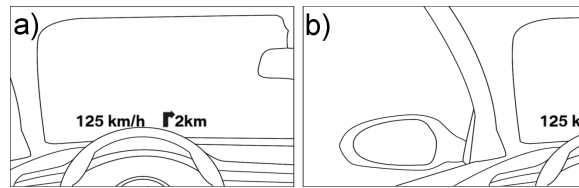
**Konzeptvarianten** In allen drei entwickelten Konzeptvarianten werden in der Blickzone  $\alpha$  die Inhalte kopfstabil angezeigt. In den Transitionszonen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  wird die Anzeige entsprechend der jeweiligen Konzeptvariante in Abhängigkeit der Kopfdrotation angepasst. Eine Kopfdrehungen in eine beliebige Richtung um mehr als den Betrag  $\alpha + \varepsilon$ , hat schließlich ein komplettes Ausblenden der Inhalte zur Folge.



**Abbildung 4.28:** Die Abbildungsfunktionen der Konzepte *Magnetic HUD*, *Relocate HUD* und *Alphablending HUD* (von links nach rechts).

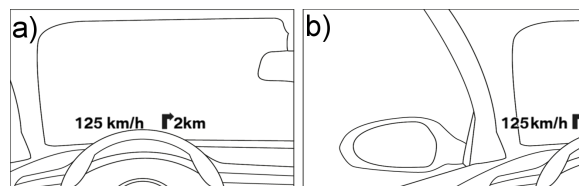
Bei dem ersten Konzept, dem sogenannten *Magnetic HUD*, wird die virtuelle Kamera, wie auch bei fahrzeugstabilen Anzeigen, in Abhängigkeit der Kopfdrotation rotiert. Im Unterschied zu fahrzeugstabilen Anzeigen, bei denen diese Übersetzung linear geschieht (vergleiche Abbildung 4.26 a), wird bei dieser *Magnetic HUD* jedoch eine exponentiell wachsende Funktion angelegt (wie in Abbildung 4.28 a). Im Ergebnis verhält sich die Anzeige sehr ähnlich zu einer fahrzeugstabilen Darstellung (siehe Abbildung 4.29), die Dynamik im Blickbereich  $\alpha$  wird jedoch durch die dort noch sehr langsam wachsende Funktion deutlich abgeschwächt. Die Anzeige wirkt dabei in diesem Bereich kopfstabil, doch scheint sie zunächst bei Kopfdrotationen, wie von einem Magneten zum Zentrum der Windschutzscheibe gezogen zu werden.

Dem zweiten Konzept, im Folgenden auch *Relocate HUD* genannt, liegt ebenfalls eine Funktion zugrunde, die Kopfdrotation auf die Kamerarotation abbildet. Hier wird jedoch eine unstetige Funktion verwendet (wie in Abbildung 4.28 b). Dadurch ist die Anzeige sowohl im  $\alpha$ -Bereich als auch in den beiden Transitionszonen ( $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$ ) eindeutig kopfstabil, verändert jedoch durch einen diskreten Sprung ihre Position. Um den verfügbaren Platz im Anzeigebereich der Datenbrille optimal zu nutzen, wird die Anzeige in den Transitionszonen zusätzlich restrukturiert. Dabei wird die Meter-Angabe für die Navigations-



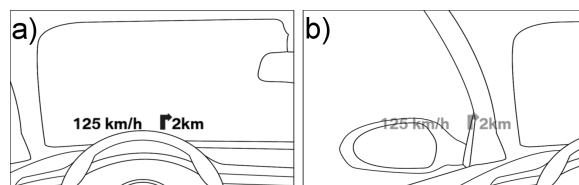
**Abbildung 4.29:** Anzeigen bei einer Kopfdrehung um die y-Achse bei dem Konzept *Magnetic HUD*.

anweisungen ausgeblendet, da davon ausgegangen wird, dass diese Information während einer Kopfdrehungssituation am entbehrlichsten ist.



**Abbildung 4.30:** Anzeigen bei einer Kopfdrehung um die y-Achse bei dem Konzept *Relocate HUD*.

Das dritte Konzept wird *Alphablending HUD* genannt und nutzt, ähnlich zu fahrzeugstabilen Anzeigen, eine lineare Abbildungsfunktion. Statt der Rotation der virtuellen Szenenkamera wird nun für die y-Achse jedoch der Transparenz-Wert der Anzeigen genutzt (wie in Abbildung 4.28 c). Dies geschieht jedoch nur innerhalb der Transitionszonen: Nach einer Überschreitung der Kopfdrotation um  $\alpha/2 + \varepsilon$  nach rechts oder links ist die Anzeige vollständig transparent, während sie innerhalb der  $\alpha$ -Zone vollständig opak ist.



**Abbildung 4.31:** Anzeigen bei einer Kopfdrehung um die y-Achse bei dem Konzept *Alphablending HUD*.

Alle drei Konzeptausprägungen haben möglicherweise das Potenzial die Nachteile von etablierten Stabilisierungsformen abzumildern oder sogar ganz zu umgehen. Die Anzeige ist bei allen drei Konzepten im Zentrum des Blickfelds kopfstabil und damit sehr ruhig und stabil in der Darstellung. Gleichzeitig werden in Verkehrssituationen, in denen eine Kopfdrehung erforderlich ist und die Anzeigen im Blickfeld des Fahrers von diesem als störend empfunden werden, die Inhalte ausgeblendet und verdecken somit keine Objekte der Umgebung mehr.

### 4.4.3 Vorstudie: Vergleich der Konzeptvarianten

In dieser ersten Vorstudie soll diejenige Konzeptvariante identifiziert werden, die für den Anwendungsfall des Autofahrens das größte Potenzial besitzt. Außerdem sollen die einzelnen Stärken und Schwächen der einzelnen Konzeptvarianten identifiziert werden, um den hier abgesteckten Design Space näher spezifizieren zu können.

**Aufbau** Die Studie fand in dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen statischen Fahrsimulator statt. Als Sitzkiste diente der im gleichen Kapitel beschriebene E60 ohne HUD-Aufbau. Inhalte wurden in der in Kapitel 3.3.3 beschriebenen LUMUS DK 32 Datenbrille dargestellt. Zur Erfassung der Kopfposition kam das in Kapitel 3.3.4 beschriebene ART Smarttrack System zum Einsatz. Dieses wurde unmittelbar vor dem Fahrer hinter dem Lenkrad befestigt.

**Stichprobe** In der Vorstudie nahmen insgesamt 15 Probanden teil. Die Versuchspersonen, davon zehn Männer und fünf Frauen, waren zwischen 22 und 59 Jahren alt ( $M=32,8$ ,  $SD=11,9$ ). Sieben Probanden gaben eine Sehschwäche an, die während des Versuchs jedoch durch das Tragen von Kontaktlinsen oder einem passenden Korrekturglas kompensiert wurde.

**Fahrszenario** Die zu befahrene Strecke untergliederte sich in drei Abschnitte. Zunächst befuhren die Versuchsproubanden einen 9,6 km langen Autobahnabschnitt, darauf folgte ein 4,4 km langer Abschnitt auf der Landstraße. Abschließend, wurde ein 2,9 km langes Stadtszenario befahren. Eine komplette Versuchsfahrt dauerte etwa 20 Minuten.

Auf den einzelnen Abschnitten wurden insgesamt 7 Situationen entworfen, in denen Probanden eine spezielle Aufgabe zu bewältigen hatten:

1. Nach dem Wechsel des Autobahnabschnitts wurde ein komplexes **Einfädelmanöver** notwendig. Dabei wurde der Fremdverkehr so programmiert, dass eine Kolonne von Fahrzeugen zunächst die rechte Spur blockierte, die Probanden also mehrmals ihre Geschwindigkeit anpassen und Ausschau nach einer Lücke im Verkehr halten mussten, bevor sie das Einfädelmanöver durchführen konnten.
2. Eine Information aus dem **Kombiinstrument** ablesen. Je nach Fahrt sollten hier entweder die gefahrenen Kilometer, die Außentemperatur oder die Tankuhr abgelesen werden. Die Zuordnung, in welcher Fahrt welche Information abgelesen werden sollte, wurde dabei abgewechselt.
3. Mit dem **CID** interagieren. Je nach Fahrt wurde eine unterschiedliche Person mittels der integrierten Telefonsteuerung ausgewählt und angerufen. Die Interaktion erfolgte dabei mit dem ZBE.
4. Ein **Überholmanöver** durchführen. Versuchspersonen wurden aufgefordert ein auf der Landstraße mit erheblich geringerer Geschwindigkeit fahrendes Nutzfahrzeug zu überholen. Dabei setzte jedoch genau wenn der Proband den Blinker setzte, ein hinter dem Probanden befindliches Fahrzeug selbst zum Überholvorgang an. Dies machte komplexere Spiegel- und Schulterblicke erforderlich.

5. Eine komplexe **Kreuzungsüberquerung** durchführen. Probanden fuhren hierbei auf eine große Kreuzung mit zwei sich kreuzenden dreispurigen Straßen zu. Eine gelb blinkende Ampel signalisierte dabei die „Vorfahrt achten“-Regelung für die Fahrspur des Probanden. Der Fremdverkehr wurde dabei so programmiert, dass sich der Proband immer an der vordersten Position in seiner Fahrspur befand und zunächst eine Reihe von Fahrzeugen aus beiden Richtungen passieren lassen musste, bevor er selbst die Kreuzung überqueren konnte.
6. Einen unerwarteten **Bremsvorgang in der Stadt** durchführen. Dabei fuhren Probanden in einer dicht beparkten, verkehrsberuhigten Zone als ein plötzlich vom Straßenrand auf die Fahrbahn scheresendes Fahrzeug sie zu einem Bremsvorgang zwang.
7. Ein **Einfädelmanöver in der Stadt** durchführen. Dabei bogen die Probanden aus einer verkehrsberuhigten Zone nach rechts auf eine mehrspurige Hauptstraße mit Einfädelspur ab und mussten sich daraufhin in den regulären Verkehrsfluss einfädeln.

Dabei war die genaue Ausprägung der Situationen (6) und (7) sehr stark vom Fahrverhalten des Probanden abhängig, so dass hier nur sehr schlecht zu vergleichende Daten gewonnen werden konnten. Aus diesem Grund werden lediglich die Situationen (1) mit (5) in die nachfolgenden Auswertungen miteinbezogen. Da letzten beiden Situationen jedoch möglicherweise das Antwortverhalten der Probanden in den Fragebögen mit beeinflusst haben, werden sie hier der Vollständigkeit halber aufgeführt.

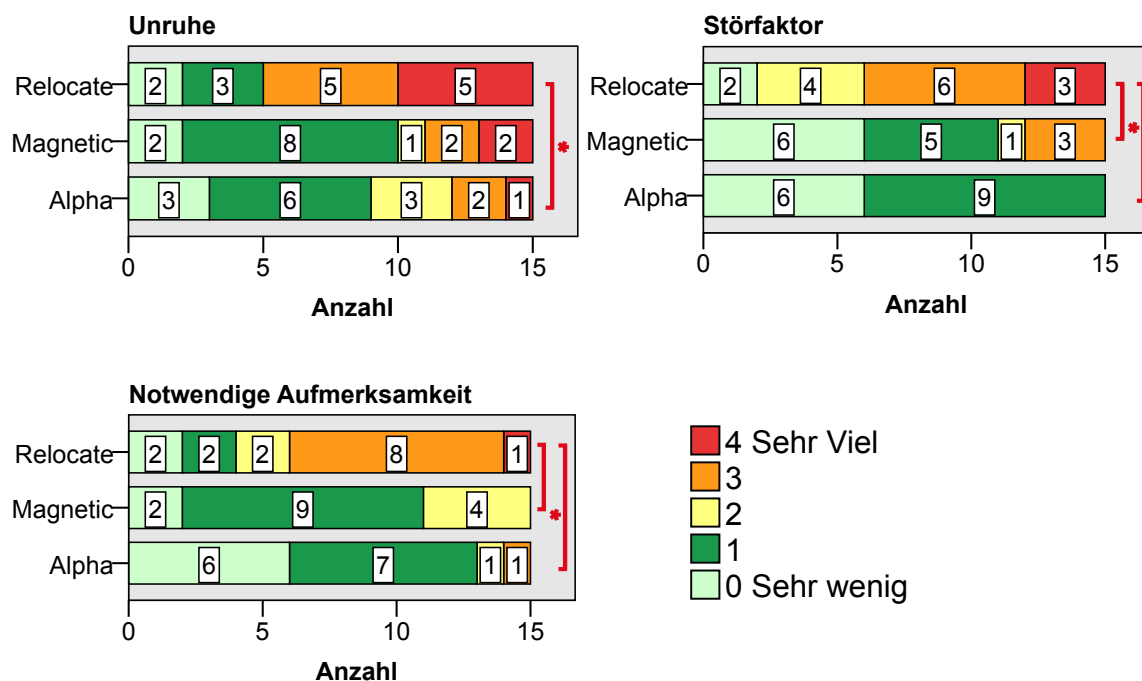
Nur die Situationen (2) und (3) benötigten dabei eine Instruktion des Versuchsleiters. Diese wurde über die Gegensprechanlage mitgeteilt, wobei die Probanden angewiesen wurden mit der eigentlichen Aufgabe erst bei dem Ertönen eines akustischen Signals zu beginnen. Alle übrigen Situationen erforderten keinerlei Instruktionen, da deren korrekte Bewältigung sich aus der Verkehrssituation implizit ergab. Eine Ausnahme bildete dabei noch die Situation (4): reagierten Probanden allzu zögerlich auf das langsame Fahrzeug, so wurden sie vom Versuchsleiter explizit zum Überholvorgang animiert.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Nach einer kurzen Eingewöhnungsfahrt und der Erfassung der demographischen Daten der Versuchspersonen, wurden diese zunächst aufgefordert in der Sitzkiste Platz zu nehmen, den Sicherheitsgurt anzulegen und die Spiegel- und Sitzeinstellungen anzupassen. Nachdem sie sich die Datenbrille aufgesetzt hatten, erfolgte zunächst ein kurzer Kalibrierungsvorgang. Hierzu wurde im Fahrzeug eine Markierung angebracht, die die Probanden mit einer ähnlichen Markierung, die in der Datenbrille angezeigt wurde, möglichst überlagern sollten. Nachdem dadurch der Nullpunkt des Koordinatensystems der virtuellen Kamera festgelegt wurde, wurden die Probanden in das aktuelle Konzept instruiert. Dabei wurde in dem Gespräch zwischen Versuchsleiter und Proband mehrmals sichergestellt, dass die Blickzonen tatsächlich auf die intendierten Bereiche im Fahrzeug abgestimmt sind, ansonsten wurde der Kalibrierungsvorgang wiederholt.

Die in der Datenbrille angezeigten Inhalte bestanden aus einer Geschwindigkeitsanzeige, einem Navigationspfeil und der dazugehörigen Manöverdistanz und einem Symbol, das die gerade aktuelle Geschwindigkeitsbeschränkung (wenn vorhanden) anzeigte. Die Fahraufgabe bestand darin, den Navigationshinweisen zu folgen und sich an die Verkehrsregeln zu halten.

Außer der Eingewöhnungsfahrt absolvierten alle Probanden drei Messfahrten, in der sie jeweils ein Konzept erproben konnten (Within-Subjects Design). Die Reihenfolge der Konzepte wurde dabei permutiert, um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Die Probanden wurden dabei in die einzelnen Situationen (siehe Abschnitt 4.4.3) während der Fahrt instruiert. Nach den Situationen (1) mit (4) wurden die Studienteilnehmer aufgefordert auf einer fünfstufigen Likert-Skala (von 1  $\hat{=}$  *überhaupt nicht* bis 5  $\hat{=}$  *sehr stark*) zu bestimmen, wie sehr die Anzeige während der zuvor absolvierten Situation jeweils gestört hat. Nach jeder Fahrt füllten die Probanden einen Fragebogen aus. Darin wurden sie gebeten auf fünfstufigen Likert-Skalen das gerade erlebte Anzeigeconcept nach verschiedenen Kriterien zu bewerten. Nach der letzten Fahrt füllten alle Versuchspersonen außerdem einen Abschlussfragebogen aus, in dem sie die gerade erlebten Konzepte in eine Rangfolge bringen sollten. Diese Wahl sollte außerdem noch begründet werden.

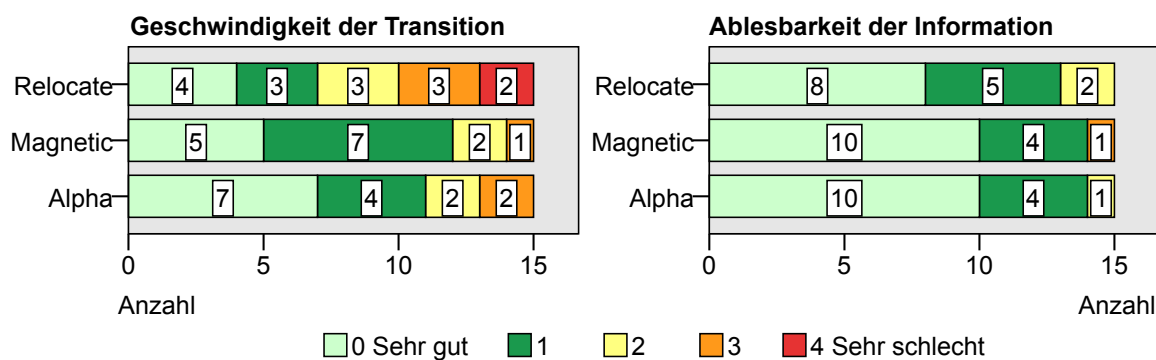
**Ergebnisse** Die Antworten in den Fragebögen wurden pro Kategorie mit einem Friedman-Test auf den Einfluss des Konzepts auf die Bewertung der Probanden analysiert. Demnach hatte das verwendete Konzept einen signifikanten Einfluss auf das Antwortverhalten in den Kategorien „Unruhe“ ( $\chi^2(2) = 8,7$ ), „Störfaktor“ ( $\chi^2(2) = 18,6$ ) und „Notwendige Aufmerksamkeit“ ( $\chi^2(2) = 13,0$ ) mit einem Bonferroni-adjustierten Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,017$  (siehe Abbildung 4.32). Gepaarte Wilcoxon-Tests ergaben signifikant positiveres Antwortverhalten für die Konzeptvariante *Alphablending HUD* (Med=1) im Vergleich zu *Relocate HUD* (Med=3) in allen drei Kategorien ( $p < 0,017$ ). Für die Kategorien „Störfaktor“ und „Unruhe“ wurde außerdem die Konzeptvariante *Magnetic HUD* (Med=1) signifikant besser bewertet als *Relocate HUD* ( $p < 0,017$ ).



**Abbildung 4.32:** Ergebnisse der Fragebögen mit signifikant unterschiedlichen Paaren (mit einem (\*) gekennzeichnet).

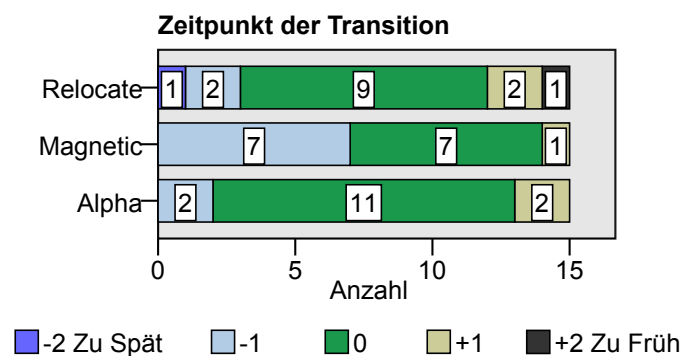
Doch auch Kategorien, in denen die Konzepte sich nicht signifikant voneinander unterscheiden, liefern Erkenntnisse über die Vor- und Nachteile der einzelnen Konzepte und of-

fenbaren mögliches Verbesserungspotenzial. So wurden Probanden nach der Ablesbarkeit der Inhalte sowie nach der Transitions geschwindigkeit gefragt (Abbildung 4.33). Dabei wird beispielsweise offensichtlich, dass die Ablesbarkeit der Information bei allen Konzepten relativ gut war (Med=4) und dieser Faktor nicht für die weitere Bewertung der Konzepte entscheidend ist. Außerdem sieht man, dass die Geschwindigkeit der Transition, also der Winkelbereich in dem die jeweilige grafische Änderung in den Konzepten stattfand, für die verschiedenen Konzepte unterschiedlich bewertet wurde. Während die Transitions geschwindigkeit bei *Relocate HUD* von mehr als 50% der Probanden neutral oder eher negativ empfunden wurde, wurde der identische Winkelbereich bei den beiden anderen Konzepten von über 70% der Studienteilnehmer als positiv oder sehr positiv eingestuft.



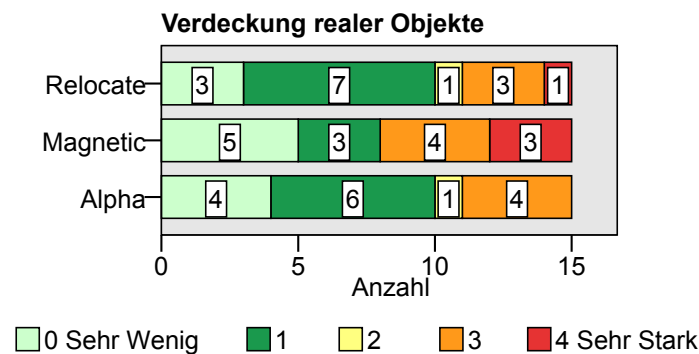
**Abbildung 4.33:** Die Geschwindigkeit der Transition und die Ablesbarkeit der Inhalte.

Neben der Dauer der Transition ist auch der Zeitpunkt, an dem sie beginnt, ein wichtiger Parameter für alle Konzepte. Wie in Abbildung 4.34 zu sehen ist, waren die Probanden mehrheitlich der Meinung, dass der Zeitpunkt gut gewählt ist. Besonders bei der relativ unaufdringlichen Transition zwischen zwei Transparenzwerten (*Alphablending HUD*) wurden hier hohe Zustimmungswerte erzielt.



**Abbildung 4.34:** Der Zeitpunkt, an dem die Transition beginnt.

Ein Haupt-Ziel bei der Entwicklung der Konzepte war es zu vermeiden, dass Objekte der realen Welt von den Anzeigen in der Datenbrille verdeckt werden. Wie in Abbildung 4.35 ist das nicht vollständig gelungen. Zumindest bei den Konzepten *Alphablending HUD* und *Relocate HUD* erlebten zwei Drittel der Probanden jedoch wenige oder sehr wenige Situationen, in denen die angezeigten Inhalte unerwünschte Verdeckungen verursachten.



**Abbildung 4.35:** Potenzial Elemente der Umgebung des Fahrers durch Anzeigen zu verdecken.

Nach den Verkehrssituationen (1) mit (4) wurden die Probanden gebeten, auf einer Skala von 1 bis 5 zu bewerten, wie störend sie die Anzeige empfanden. Dabei war ein Friedman-Test für die erste Situation (Einfädelmanöver) signifikant ( $\chi^2(2) = 11,5, p < 0,05$ ). Gepaarte Wilcoxon-Tests legten für diese Situation einen signifikanten Unterschied zwischen den Konzepten *Alphablending HUD* (Med=0) und *Relocate HUD* (Med=2) offen ( $p < 0,017$ ).

Zusätzlich wurden für die Situationen (2) und (3) SDLP-Werte und die Standardabweichung der Geschwindigkeit für die drei Konzepte verglichen und mit einer Varianzanalyse (ANOVA) auf Unterschiede überprüft. Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Im Abschlussfragebogen wurden die Probanden gebeten, die erlebten Konzepte in eine Rangfolge zu bringen. Dabei belegte für 9 der 15 Probanden das Konzept *Alphablending HUD* den ersten Platz (66,7%). Während keiner der Probanden *Relocate HUD* bevorzugte, waren immerhin 6 Probanden (33,3%) der Meinung, dass *Magnetic HUD* das beste Konzept sei.

**Diskussion** Betrachtet man die Ergebnisse der Vorstudie, so ist zunächst einmal festzustellen, dass die Probanden die gewählten Werte für die wichtigen Parameter der Konzeptvarianten überwiegend positiv bewerteten. So stellte Ablesbarkeit der Informationen in keinem der Konzepte ein Problem dar. Die prototypische Displayqualität der Datenbrille hatte hier vermutlich also keinen negativen Einfluss auf die Studienergebnisse. Auch die Geschwindigkeit der Transitionen, also die Veränderung der Positions- und Transparenzwerte, wurde scheinbar passend gewählt. Der Zeitpunkt, an dem die Transition beginnt, wurde allerdings bei dem Konzept *Magnetic HUD* von sieben Probanden als etwas zu spät erachtet, während dieser bei den anderen beiden Konzeptvarianten von der Mehrheit der Studienteilnehmer als genau richtig bezeichnet wurde. Es besteht jedoch an dieser Stelle kein signifikanter Unterschied zwischen den Konzepten, so dass auf eine Parameter-Korrektur und eine Wiederholung der Vorstudie verzichtet wurde.

Die größten Unterschiede zwischen den Konzepten traten besonders bei den Vergleichen mit dem Konzept *Relocate HUD* hervor. Es wurde von den Probanden mit Abstand am seltensten favorisiert. Die Gründe hierfür können in den Daten identifiziert werden: das Konzept erforderte signifikant mehr Aufmerksamkeit und wurde als signifikant störender empfunden als die beiden anderen Konzepte. Auch wenn *Relocate HUD* nur im Vergleich



mit *Alphablending HUD* signifikant unruhiger empfunden wurde, spielte dieser Faktor sicherlich eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der Konzepte durch die Probanden. Vermutlich waren die diskreten Positionssprünge der Inhalte im Blickfeld der Fahrer für diese negativen Bewertungen verantwortlich.

Signifikante Unterschiede zwischen *Magnetic HUD* und *Alphablending HUD* können in den einzelnen Kategorien nicht identifiziert werden. Beide Konzepte wurden von den Probanden als überzeugend empfunden und besitzen damit das Potenzial weiter untersucht zu werden. In der finalen Entscheidung, welches Konzept die Probanden am meisten überzeugt hatte, setzte sich jedoch *Alphablending HUD* mit einer Zweidrittelmehrheit überzeugend durch.

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass die Kopfrotation des Fahrers nicht nur dazu genutzt werden kann ein herkömmliches HUD zu imitieren. Stattdessen beeinflusst diese das Erscheinungsbild der Anzeigen auf unterschiedliche Weise: in den hier entwickelten Konzeptvarianten wurde die Kopfposition verwendet, um die Anzeigeposition und die Transparenz der Inhalte zu verändern. Insbesondere letzteres wurde von den Probanden positiv bewertet und könnte eine Alternative zu etablierten Anzeigeformaten darstellen. Besonders die diskrete Positionsänderung bei gleichzeitiger Änderung der Anzeigenstruktur wurde von den Probanden als sehr negativ bewertet (*Relocate HUD*). Diese Transition wurde als eher ablenkend und unruhig bewertet.

#### 4.4.4 Hauptstudie: Vergleich mit dem Stand der Technik

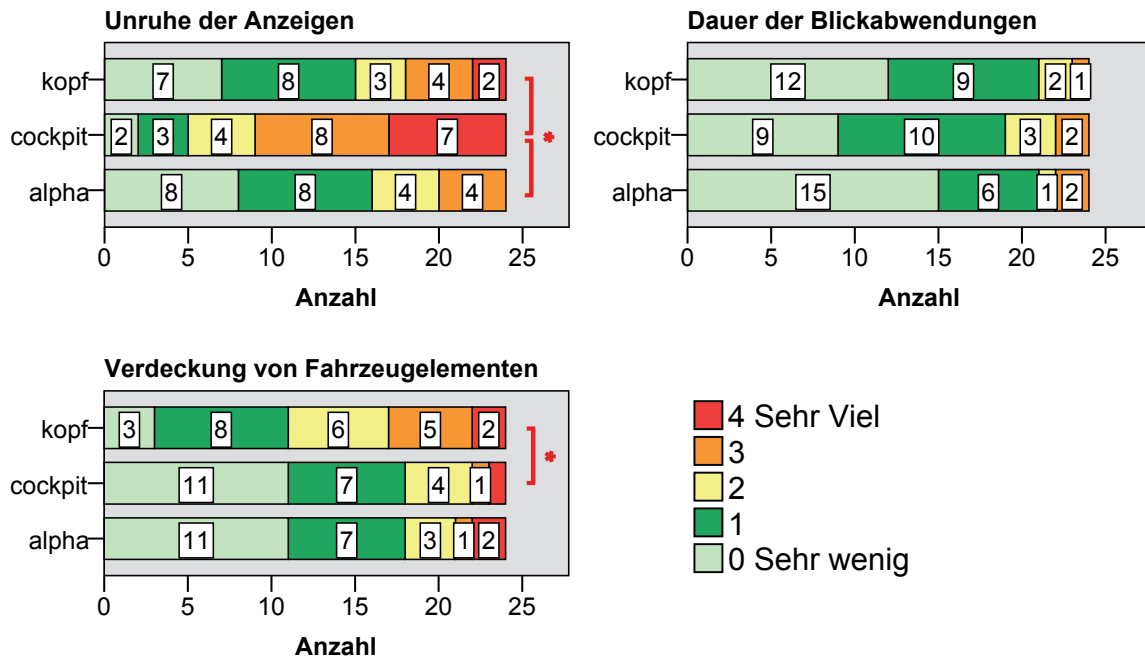
Nachdem in einer Vorstudie das Konzept mit dem größten Zuspruch identifiziert wurde, soll dieses nun mit dem Stand der Technik verglichen werden. Interessant wird dabei zu sehen, ob das neue Konzept tatsächlich die intendierten Vorteile gegenüber kopf- und fahrzeugstabilen Anzeigen besitzt.

**Aufbau** Der Aufbau der Hauptstudie war identisch mit dem der Vorstudie.

**Stichprobe** An der Hauptstudie nahmen insgesamt 24 Probanden teil. Nur sechs der Versuchspersonen waren weiblich, die übrigen 20 männlich. Die Studienteilnehmer waren zwischen 22 und 50 Jahre alt ( $M=27,7$ ;  $SD=7,5$ ). Nur insgesamt sechs Probanden gaben an, an einer Sehschwäche zu leiden. Diese wurde gegebenenfalls während des Versuchs durch Kontaktlinsen oder entsprechenden Korrekturgläsern kompensiert. Keiner der Probanden hatte bereits an der Vorstudie teilgenommen.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Auch das Studien-Design unterschied sich methodisch nicht von dem der Vorstudie. Lediglich die unabhängige Variable besitzt nun andere Ausprägungen, nämlich *Alphablending HUD*, *Kopfstabiles HUD* und *Fahrzeugstabiles HUD*. Die Fragebögen besitzen ebenfalls die gleiche Struktur, lediglich die Kategorien in denen die Probanden die Konzepte bewerten sollten wurden teilweise modifiziert (siehe nachfolgendes Ergebnis-Kapitel).

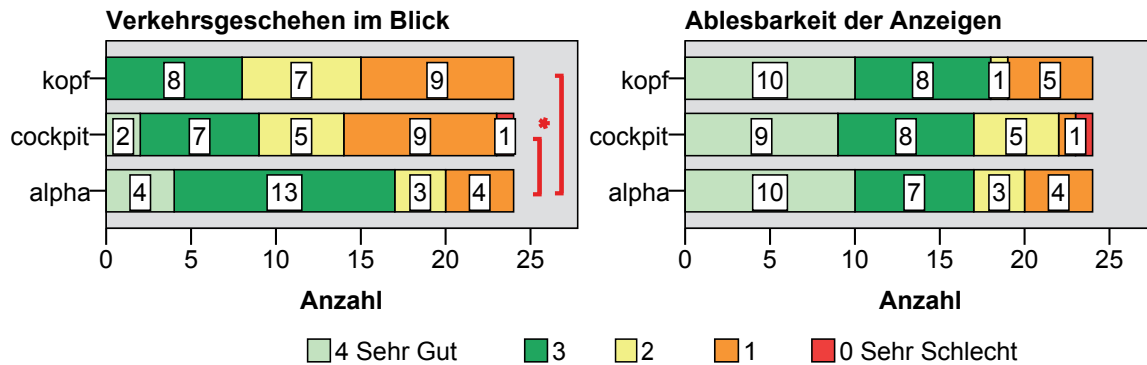
**Ergebnisse** Wieder wurden die drei Konzepte in verschiedenen Kategorien von den Probanden mittels 5-Stufiger Likert-Skalen bewertet. Mittels Friedman-Tests wurden signifikante Unterschiede in den Kategorien „Dauer der Blickabwendung“ ( $\chi^2(2)=6,3$ ,  $p<0,05$ ), „Fähigkeit das Verkehrsgeschehen im Blick zu behalten“ ( $\chi^2(2)=11,0$ ,  $p<0,05$ ), „Unruhe der Anzeige“ ( $\chi^2(2)=15,7$ ,  $p<0,05$ ) und „Verdeckung von Fahrzeugelementen“ ( $\chi^2(2)=12,2$ ,  $p<0,05$ ) identifiziert (siehe Abbildung 4.36 beziehungsweise Abbildung 4.37). Für diese Kategorien wurden nachfolgend paarweise Wilcoxon-Tests durchgeführt.



**Abbildung 4.36:** Antwortverhalten der Probanden für die Kategorien „Unruhe der Anzeigen“, „Dauer der Blickabwendung“ und „Verdeckung von Fahrzeugelementen“. Signifikante Unterschiede zwischen den Anzeigemodalitäten sind mit einem (\*) gekennzeichnet ( $p<0,05$ ).

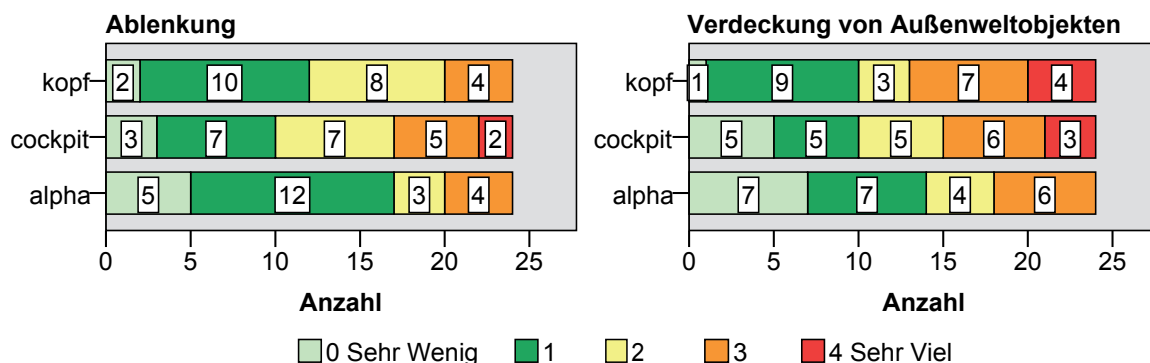
Signifikante Unterschiede bestanden zunächst in der Kategorie „Unruhe der Anzeigen“ zwischen kopfstabilen (Med=1) und cockpitstabilen (Med=3) Anzeigen sowie zwischen cockpitstabilen Anzeigen und *Alphablending HUD* (Med=1,  $p<0,017$ ). Die von den Probanden empfundene „Dauer der Blickabwendungen“ unterschied sich hingegen nicht signifikant zwischen den Konzeptvarianten. Hier konnte das Konzept *Alphablending HUD* (Med=0) die besten Werte erzielen, kopfstabile Anzeigen erzielten mit einem Median von 0,5 die zweitbeste und cockpitstabile Anzeigen mit einem Median von 1,0 die schlechteste Bewertung. Die „Verdeckung von Fahrzeugelementen“ spielte wie erwartet bei den kopfstabilen Anzeigen (Med=2) eine signifikant größere Rolle als bei den cockpitstabilen Anzeigen (Med=1,  $p<0,017$ ). Das Konzept *Alphablending HUD* wurde mit einem Median von 1,0 zwar ebenso sehr positiv bewertet, unterschied sich jedoch nicht signifikant von kopfstabilen Anzeigen. Außerdem gaben die Probanden an das Verkehrsgeschehen signifikant besser mit dem Konzept *Alphablending HUD* (Med=3) im Blick zu haben als mit den kopfstabilen (Med=2,  $p<0,017$ ) oder cockpitstabilen (Med=2) Anzeigen ( $p<0,025$ ).

Für die übrigen Kategorien „Ablesbarkeit der Anzeigen“, „Ablenkung“ und „Verdeckung von Objekten der Außenwelt“ ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den



**Abbildung 4.37:** Antwortverhalten der Probanden für die Kategorien „Verkehrsgeschehen im Blick“ und „Ablesbarkeit der Anzeigen“. Signifikante Unterschiede zwischen den Anzeigemodalitäten sind mit einem (\*) gekennzeichnet ( $p < 0,05$ ).

Anzeige-konzepten. Für alle drei Konzepte wurde die Ablesbarkeit der Inhalte von über 70% der Probanden als „gut“ oder „sehr gut“ bewertet. Die Reduzierung der Verdeckungseffekte mit den Objekten der Außenwelt und die durch die Anzeige hervorgerufene Ablenkung war mit einem Signifikanzniveau von 5% nicht signifikant. Dieses Ergebnis wurde mit Friedman-Tests von  $p = 0,06$  (Verdeckung) respektive  $p = 0,07$  (Ablenkung) allerdings nur sehr knapp verfehlt.



**Abbildung 4.38:** Antwortverhalten der Probanden für die Kategorien „Ablenkung“ und „Verdeckung von Objekten der Außenwelt“.

Bei dem Vergleich der Konzepte bezüglich des Antwortverhaltens der Probanden nach den Verkehrssituationen offenbarten Friedman-Tests signifikante Unterschiede bei der ersten ( $\chi^2(2) = 6,6, p < 0,05$ ) und dritten ( $\chi^2(2) = 10,5, p < 0,05$ ) Situation. In der ersten Situation, dem Einfädelvorgang, wurde das Konzept *Alphablending HUD* (Med=1) signifikant besser bewertet als kopfstabile (Med=1) und fahrzeugstabile (Med=2) Anzeigen ( $p < 0,017$ ). In der dritten Situation, der Interaktion mit dem CID, gab es signifikante Unterschiede im Antwortverhalten bei der kopfstabilen Anzeige im Vergleich zu den fahrzeugstabilen Anzeigen ( $p < 0,017$ ). Die kopfstabile Anzeige (Med=1) wurde hierbei schlechter bewertet als fahrzeugstabile Anzeigen (Med=1).

Wie auch in der Voruntersuchung, ergab ein Vergleich der SDLP-Werte für die Situationen (2) und (3) keine signifikanten Unterschiede.

Bei der Frage, welches Konzept Probanden favorisierten, entschieden sich letztlich 16 Probanden für das Konzept *Alphablending HUD*, was einem Anteil 66,7% entspricht. Lediglich fünf Versuchspersonen entschieden sich für fahrzeugstabile Anzeigen (20,8%) und nur drei Studienteilnehmer (12,5%) waren der Ansicht, dass kopfstabile Anzeigen sie am besten bei der Fahrt unterstützten.

#### 4.4.5 Diskussion

Nachdem sich das Konzept *Alphablending HUD* in einer Vorstudie relativ deutlich gegen die beiden Alternativen *Relocate HUD* und *Magnetic HUD* durchgesetzt hatte, wurde es nun in einer weiteren Studie mit dem Stand der Technik verglichen: mit kopfstabilen und fahrzeugstabilen Anzeigen. Bei der genaueren Betrachtung der Probandeneinschätzungen wird deutlich, dass sich *Alphablending HUD* tatsächlich so verhält, wie es beabsichtigt wurde. Genau wie kopfstabile Anzeigen wirkt es signifikant ruhiger als cockpitstabile Anzeigen. Gleichzeitig reduzieren sich die Verdeckungen mit Elementen des Fahrzeugs (Außenspiegel, Displays) im Vergleich zu kopfstabilen Anzeigen. Die subjektiv empfundene Dauer der Blickabwendungen unterschied sich hingegen kaum zwischen den Konzeptvarianten, wurde jedoch besonders bei kopfstabilen Anzeigen und bei dem Konzept *Alphablending HUD* sehr positiv bewertet. Ein wichtiger Faktor ist auch die Fähigkeit des Fahrers, das Verkehrsgeschehen trotz der Anzeigen in seinem Blickfeld immer noch im Blick zu haben und korrekt interpretieren zu können. Auch hier hat das Konzept *Alphablending HUD* zumindest was die subjektive Einschätzung dieses Faktors betrifft, signifikante Vorteile im Vergleich zu beiden etablierten Stabilisierungsformen.

Letztlich handelt es sich bei den gewonnenen Daten jedoch um die subjektive Einschätzung der Versuchspersonen. Insbesondere das Blickverhalten der Probanden und die verbesserte Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens sind wichtige Kriterien, die jedoch auch mit objektiven Daten untermauert werden sollten. Die Verwendung eines Blickerfassungssystems ist jedoch in Kombination mit dem gleichzeitigen Tragen einer Datenbrille nur schwer möglich und die Bestimmung der Fokusebene des Fahrers zur Unterscheidung zwischen einem Blick auf die Inhalte in der Datenbrille und auf die der Fahrsituation eine zusätzliche Herausforderung. In jedem Fall müsste hierfür eine Simulationsumgebung geschaffen werden, in der sich die Distanz zwischen der Projektion der Simulation und dem Probanden deutlich von der Projektionstiefe der Datenbrille unterscheidet. Ein verbessertes Verständnis der aktuellen Verkehrssituation ist jedoch nicht nur vom Blickverhalten der Probanden abhängig; hier müsste ein Versuchsdesign, welches gezielt das Situationsverständnis (siehe zum Beispiel Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT) [39]) der Probanden prüft, angewandt werden.

Mit den in diesem Kapitel vorgestellten Konzepten wurden neue Techniken vorgestellt, wie sich die Kopfdrehung für die dynamische Anpassung von Anzeigen in einer Datenbrille verwenden lässt. Dabei wurde ein Weg gefunden die heute bestehenden technischen Probleme fahrzeugstabiler Anzeigen abzuschwächen. Außerdem eröffnen die vorgestellten Konzepte einen neuen Design Space, in dem Kopffrotation nicht mehr nur für die Stabilisierung von Anzeigen im Raum genutzt wird. Die nichtlineare oder gar unstetige Abbildung der Kopfbewegungen auf die Darstellungsposition der Anzeigen sowie die Verwendung

anderer Ausgangsgrößen, wie Transparenz oder Struktur der Anzeigen, könnten auch in anderen Anwendungsfällen zu interessanten Ergebnissen führen.

Das entwickelte Konzept *Alphablending HUD* eignet sich besser für die Anwendung im Fahrzeug als die etablierten kopfstabilen oder fahrzeugstabilen Anzeigevarianten. Es vereint die Vorteile beider Stabilisierungsarten ohne die jeweiligen Nachteile in Kauf nehmen zu müssen: die Anzeige ist, wie kopfstabile Inhalte, ruhig und stetig ohne gleichzeitig wichtige Elemente in der Umgebung des Fahrers zu verdecken.



# Kapitel 5

---

## Interaktionstechniken

In Kapitel 4 wurde vor allem untersucht, unter welchen Voraussetzungen Inhalte fahrzeugstabil oder kopfstabil angezeigt werden sollten. Im Fahrzeug gibt es jedoch zahlreiche Funktionen, deren Aufgabe nicht nur darin besteht, den Fahrer über deren aktuellen Zustand zu informieren. Mit Fahrassistenzsystemen interagieren Fahrer beispielsweise bidirektional: einerseits müssen dem Fahrer ständig Informationen über den aktuellen Zustand des Systems bereitgestellt werden, andererseits erfordern diese Systeme auch die Eingaben des Fahrers. Sie müssen parametrisiert und je nach System möglicherweise auch häufiger aktiviert und deaktiviert werden (wie zum Beispiel die Assistenzfunktion ACC). Aber besonders Funktionen, die den Fahrer informieren und unterhalten sollen, beruhen auf den Eingaben des Fahrers: Kommunikationsdienste oder das Abrufen multimedialer Inhalte werden im Fahrzeug immer wichtiger. Fahrzeugführer haben das Bedürfnis diese zu nutzen, sowohl während der Fahrt, im Stand oder mit neu gewonnenen Kapazitäten während der Nutzung fortschrittlicher Assistenzsysteme.

In diesem Kapitel wird daher untersucht, auf welche Weise Fahrer am besten mit den in einer Datenbrille angezeigten Inhalten interagieren können und in welchen Anwendungsfällen die Vorteile der Datenbrille am besten genutzt werden können. Hierzu werden unterschiedliche Konzepte entwickelt, anhand derer verschiedene Interaktionsmodalitäten evaluiert werden. Neben neuen Erkenntnissen über die Nutzung der Bedienmodalitäten während der Fahrt wird weiterhin auch überprüft, ob mögliche Wechselwirkungen zwischen Interaktionsmodalität und der Stabilisierung der Inhalte bestehen.

Bei der Auswahl der Interaktionsmodalitäten wird, neben der Benutzung der etablierten Bedieneinheiten Dreh-Drück-Steller und Multifunktionslenkrad, auch die Interaktion mittels Touch-, Augen- sowie Handgesten untersucht. Obwohl durch die Markteinführung von Google Glass die Spracheingabe auf der Datenbrille mittlerweile Stand der Technik ist, wird diese Modalität in den folgenden Untersuchungen nicht betrachtet. Der Grund dafür liegt darin, dass bei der Interaktion mittels Sprache keine Besonderheiten durch die gleichzeitige Benutzung der Datenbrille zu erwarten sind. Allgemeine Vorteile und Herausforderungen der Spracheingabe im Fahrzeug sind kein Betrachtungsgegenstand vorliegender Arbeit und können vermutlich direkt auf die Nutzung mit der Datenbrille übertragen werden.

## 5.1 Indirekte Interaktion durch Blickgesten

Das Kapitel 5.1 basiert auf der Bachelorarbeit: „Interaction with a head-mounted display through eye gestures“. Die Bachelorarbeit wurde angefertigt von Johannes Franz (2013). Themenstellung, Betreuung und wesentliche Teile der Konzeptentwicklung und des Studiendesigns stammen von Felix Lauber. Die Programmierung der für die Untersuchungen notwendigen Software, die Durchführung der Studien sowie Teile deren Auswertung wurden von Johannes Franz geleistet.

### 5.1.1 Motivation

Ein Vorteil einer Datenbrille, der sich insbesondere im Fahrzeug nutzen lässt, ist die Möglichkeit Inhalte direkt in das Blickfeld des Fahrers einzublenden. Der physikalische Aufwand, den der Fahrer zu deren Wahrnehmung betreiben muss, ist somit minimal. Eine Kopfdrehung ist in keinem Fall erforderlich und sofern eine geeignete Projektionsdistanz für die Darstellungsebene der Brille realisiert wurde, muss der Fahrer nicht einmal zwischen Fahrszene und Inhalten umfokussieren. Daher ist es erstrebenswert, die Interaktion mit den Inhalten ebenso einfach und mühelos zu realisieren. Da sich die Datenbrille ohnehin vor den Augen des Fahrers befindet, können hier durch einen zusätzlichen, optischen Sensor Daten über die Position der Pupille erfasst werden. Die Nutzung von Blickdaten zur Interaktion mit Inhalten in einer Datenbrille wurde wegen ihrer offensichtlichen Vorteile gegenüber anderen Interaktionsmodalitäten bereits intensiv untersucht:

Ob ein reales Objekt der Umgebung des Trägers angesehen wird oder nicht, wurde beispielsweise dazu genutzt mehr Informationen zu diesem Objekt anzuzeigen oder zu verbergen. In einigen Arbeiten wurde hierzu lediglich überprüft, ob sich das entsprechende Objekt eine gewisse Zeit im Zentrum des Anzeigebereichs der Datenbrille befindet (zum Beispiel in [42, 77, 130]). Während in diesen Arbeiten lediglich die Kopfrotation dazu verwendet wird bestimmte Objekte als „interessant für den Nutzer“ zu klassifizieren, wurde in anderen Projekten die Blickrichtung unabhängig von der Rotation des Kopfes bestimmt. Dabei wurden zunächst Informationen darüber gesammelt, welche Objekte in der Umgebung des Nutzers dessen Interesse wecken, um ihm dann gezielt und kontextabhängig Zusatzinformationen dazu anzeigen zu können [3]. Nilsson et al. entwickelten ein Konzept für die Interaktion mit Menüstrukturen in einer Datenbrille: virtuelle Elemente können durch einfaches Ansehen selektiert werden [115]. Bei einer derartigen Entwicklung besteht jedoch die Gefahr, dass das sogenannte Midas-Touch-Problem auftritt: dem Nutzer fällt es sehr schwer sich in der virtuellen Informationsstruktur zurecht zu finden, da er jedes Element, das er ansieht, auch selektiert [67]. Eine visuelle Orientierung und Entscheidungsfindung ist also zunächst nicht möglich. Neben der Möglichkeit der Implementierung einer zusätzlichen Modalität (wie etwa eines Knopfes) zur expliziten Selektion von Elementen, kann dieses Problem auch durch die Verwendung von Augengesten umgangen werden [34]. Auch Nilsson et al. arbeiten im Grunde nach diesem Prinzip: Menü-Elemente erscheinen erst wenn der Nutzer in den peripheren Bereich des Anzeigebereichs blickt [115]. Weitere



Vorteile der Verwendung von Augengesten sind die fehlende Notwendigkeit der Kalibrierung und geringere Genauigkeitsanforderungen an das Blickerfassungssystem [34].

In diesem Kapitel soll das Potenzial von Blickgesten-basierender Interaktion mit Inhalten in der Datenbrille während der Fahrt untersucht werden. Da bei der Bedienung von Funktionen im Fahrzeug strenge Rahmenbedingungen bezüglich Blickabwendung und Ablenkung bestehen, wird die Komplexität der Gesten zunächst auf ein absolutes Minimum reduziert. In einer Studie wird dann anhand von Anwendungsfällen mit unterschiedlicher Komplexität untersucht, ob und bis zu welchen Grenzen die Interaktion mittels Augengesten im Fahrzeug möglich ist.

### 5.1.2 Konzept

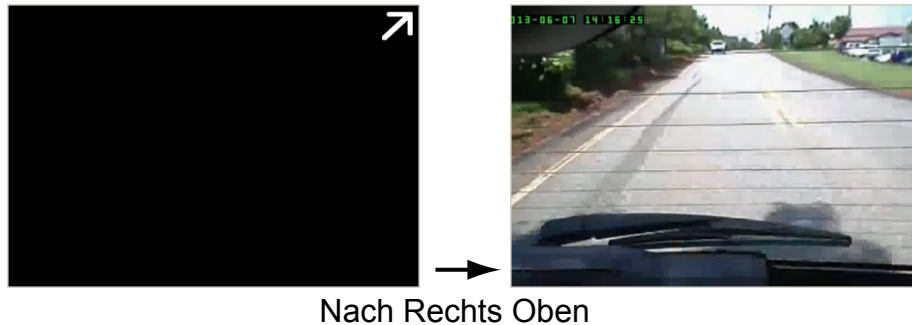
**Vorüberlegungen** Die Augengesten, die für die nachfolgenden Konzepte verwendet werden, wurden so gestaltet, dass die Interaktion mit der Datenbrille so einfach wie möglich gestaltet und gleichzeitig die nötige Blickabwendung auf ein Minimum zu reduziert wird. Augengesten sollten, so die Prämisse für die nachfolgenden Konzepte, nur aus einer einzigen Bewegung bestehen. Um die notwendige Unterscheidbarkeit zu natürlichen Augenbewegungen zu gewährleisten und so ein unbeabsichtigtes Auslösen der entsprechenden Funktionen zu verhindern, sollten diese allerdings relativ stark ausgeprägt sein.

Von Noorden und Campos beschreiben die verschiedenen Positionen, die ein menschliches Auge durch seine drei Drehachsen einnehmen kann [168]. Sie unterscheiden dabei zwischen der Primärposition, vier Sekundärpositionen und vier Tertiärpositionen. Die Primärposition wird dabei als die Position beschrieben, die das Auge hat, wenn ein Mensch in aufrechter Position und ohne eine Rotation des Kopfes vorzunehmen geradeaus nach vorne sieht. Die vier Sekundärpositionen nehme das Auge ein, wenn das Auge nur um jeweils eine Drehachse, also nasal (adduction) beziehungsweise temporal (abduction) oder superior (sursumduction) beziehungsweise inferior (deorsumduction) bewegt wird. Tertiärpositionen hingegen nehme das Auge ein, wenn es um zwei Drehachsen gleichzeitig bewegt wird, also nach links oben, links unten, rechts oben oder rechts unten. Sowohl Tertiär- als auch Sekundärpositionen werden im Folgenden für mögliche Augengesten in Betracht gezogen.

Da fast alle Anzeige- und Bedienelemente im Fahrzeug unterhalb der Sichtachse des Fahrers angeordnet sind, werden die unteren Sekundär- und Tertiärpositionen wegen der Gefahr einer falsch positiven Gestenerkennung vom möglichen Gestenvokabular ausgeschlossen. Somit bleiben die linke, rechte und obere Sekundärposition, sowie die zwei oberen Tertiärpositionen als mögliche Gesten für die Bedienung der nachfolgenden Anwendungsfälle.

**Anwendungsfälle** Auch der Funktionsumfang der entwickelten Anwendungen wurde auf kleine, schnell zu bewältigende Aufgaben reduziert. Der erste Anwendungsfall, der für die Bedienung mit einer Augengeste umgesetzt wurde, war der Zugriff auf den Innenspiegel. Dabei wurde das normale Blickverhalten eines Fahrers - eine kurze Bewegung der Augen nach rechts oben - für die Aktivierung der Spiegelanzeige genutzt. Führt der Fahrer diese Augenbewegung durch (rechte, obere Tertiärposition), so wird dies vom System erkannt und das Bild einer nach hinten gerichteten Kamera innerhalb des Blickfelds des

Fahrers angezeigt (siehe Abbildung 5.1). Dieses Videobild wird dann für einen Zeitraum von fünf Sekunden angezeigt, bevor es wieder ausgeblendet wird. Die Anzeigedauer des Videobildes lässt sich jedoch verlängern, indem während des Anzeigezeitraums eine erneute Augengeste nach rechts oben durchgeführt wird.



**Abbildung 5.1:** Blickt der Nutzer nach rechts oben, so wird für einen Zeitraum von fünf Sekunden ein Videobild einer nach hinten gerichteten Kamera eingeblendet.

Der zweite Anwendungsfall wurde der Bedienung eines Smartphones nachempfunden, welche notwendig ist, um einen Anruf anzunehmen oder abzulehnen. Die beiden äußeren Sekundärpositionen (links und rechts) des Auges werden verwendet, um die Auswahl vorzunehmen (siehe Abbildung 5.2). Wurde ein Anruf angenommen, so kann er mit einer Augenbewegung nach rechts beendet werden.

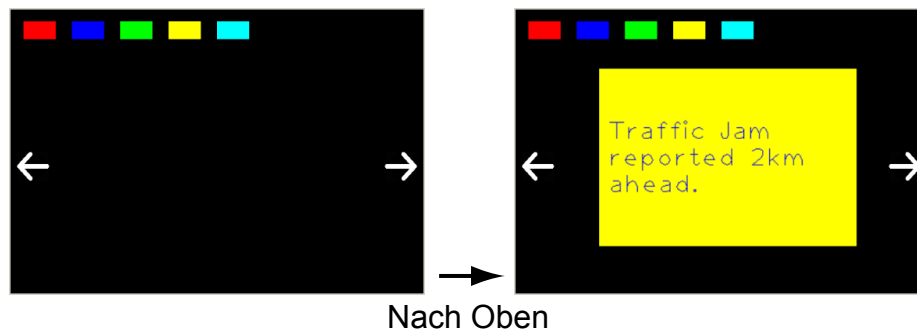


**Abbildung 5.2:** Erhält der Nutzer einen Anruf, so kann er diesen entweder annehmen (Blick nach links) oder ablehnen (Blick nach rechts).

Der dritte Anwendungsfall wurde zum Empfang und Lesen von kurzen Statusmitteilungen des Systems konzipiert. Aktuelle Statusmitteilungen werden zunächst am oberen Bildschirmrand angezeigt. Blickt der Fahrer nach oben (Sekundärposition), so wird eine vergrößerte Ansicht einer der Nachrichten angezeigt (siehe Abbildung 5.3).

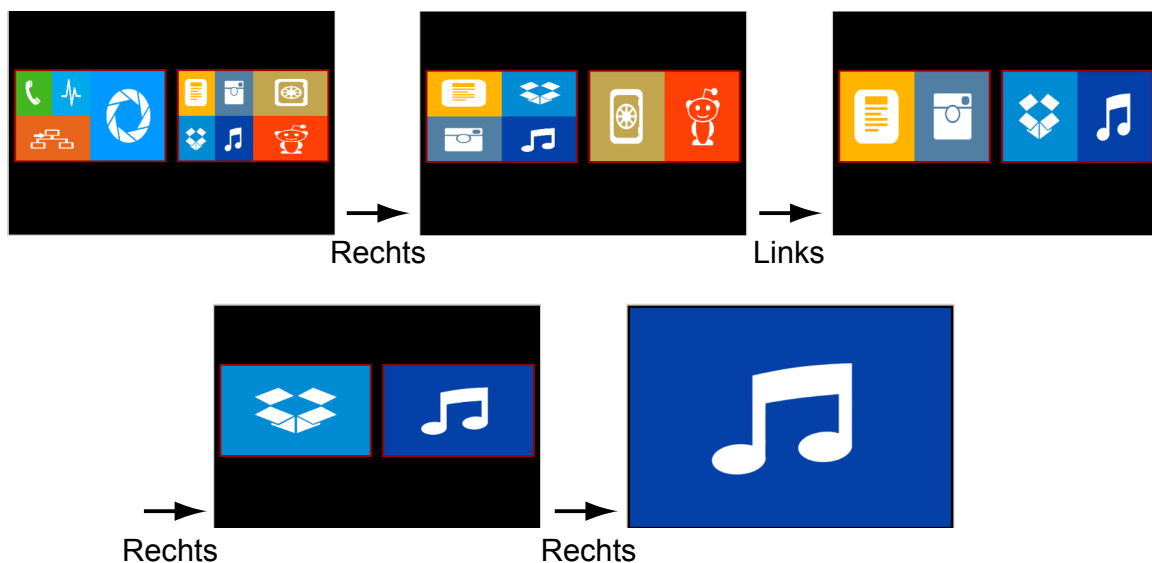
Nun kann der Fahrer durch Blickgesten nach links und rechts (äußere Sekundärpositionen) durch die Nachrichten blättern. Alternativ blättert das System mit einem Zeitabstand von fünf Sekunden selbständig durch die Mitteilungen. Will der Nutzer die Anzeige wieder minimieren, so muss hierfür eine Augengeste nach oben durchgeführt werden.

Zuletzt wurde eine komplette Menüstruktur so konzipiert, dass sie mit einfachen Blickgesten bedienbar ist, das sogenannte *Binary UI*. Das Menü ist aufgebaut wie ein binärer Baum, dessen Blätter von den Menü-Elementen belegt werden. Die Darstellung des Menüs erfolgt durch die Anzeige beider Äste, welche wiederum durch die Gesamtzahl der an



**Abbildung 5.3:** Der Nutzer kann Nachrichten, die am oberen Rand des Anzeigebereichs als Miniatur abgebildet sind, durch einen Blick nach oben zunächst vergrößert anzeigen. Anschließend kann er durch Blicke nach links oder rechts durch die verfügbaren Nachrichten blättern.

ihren Blättern befindlichen Funktionen repräsentiert werden. Der Benutzer wählt einen Ast aus indem er eine Blickgesten nach links beziehungsweise rechts durchführt. Gelangt der Nutzer zu einem Blatt, so wird die Funktion ausgewählt. Ein vollständiger Ablauf einer Menüinteraktion bis zur Auswahl einer Funktion wird in Abbildung 5.4 gezeigt. Mit einem Blick nach oben (Sekundärposition) gelangt der Nutzer an den Wurzelknoten (gesamtes Menü) zurück.



**Abbildung 5.4:** Im Anwendungsfall *BinaryUI* kann eine komplette Menüstruktur nur durch zwei Blickgesten (rechts und links) bedient werden.

### 5.1.3 Studie

**Prototyp** Um die erarbeiteten Konzepte in einer Studie testen zu können, wurden sie zunächst prototypisch implementiert (siehe Abbildung 5.5). Hierzu wurde die in Kapitel

3.3.3 beschriebene LUMUS DK-31 Datenbrille verwendet. Durch die monokulare Bauweise der Datenbrille wird ein Auge nicht durch ein Display verdeckt, welches durch einen optischen Sensor erfasst werden kann. Hierzu wurde eine Logilink UA0161 Kamera so am Gestell der Datenbrille befestigt, dass sie in einer Entfernung von etwa drei bis vier Zentimetern direkt auf das linke Auge des Nutzers gerichtet ist. Die Kamera besitzt einen 0,3 Megapixel-Sensor, mit dem das resultierende Bild bei einer Framerate von 30 Hz eine Auflösung von maximal  $640 \times 480$  Pixel erreicht. Auch wenn die Kamera erst ab einer Distanz von etwa fünf Zentimetern die maximale Bildschärfe erreicht, wurde im beschriebenen Aufbau eine zur Erkennung der Pupille hinreichende Bildqualität erzielt.



**Abbildung 5.5:** Prototyp bestehend aus monokularer LUMUS DK-31 Datenbrille und einer Logilink-Kamera, die auf das Auge des Nutzers gerichtet ist.

Die entwickelte Software basiert auf einem frei verfügbaren „open source“-Projekt der ITU Kopenhagen, dem ITU Gaze Tracker<sup>12</sup>. Hierbei handelt es sich um einen kostenfreien Blickerkenner, der die Blickrichtung anhand eines Videobildes erkennt und über eine UDP-Verbindung an ein Client-Programm sendet.

**Aufbau** Die Studie wurde mit dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Tischaufbau ohne HUD durchgeführt.

**Stichprobe** An der Studie nahmen insgesamt 11 Versuchspersonen teil, davon fünf Frauen und sechs Männer. Das Alter der Probanden lag zwischen 20 und 34 Jahren ( $M=25,3$ ,  $SD=3,7$ ). Sieben Versuchspersonen trugen während des Versuchs Kontaktlinsen.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Die Probanden wurden zunächst aufgefordert in der Sitzkiste Platz zu nehmen und die Datenbrille aufzusetzen. Nun absolvierte jeder Proband eine kurze Eingewöhnungsfahrt (fünf Minuten), um ihn an die Fahrsimulation, die Bedienung der Sitzkiste und das Fahren mit der Datenbrille zu gewöhnen. Anschließend wurde den Probanden das Konzept der Blickinteraktion sowie der erste Anwendungsfall erklärt und die erste Messfahrt gestartet.

<sup>12</sup> <http://www.gazegroup.org/forum/>, Programmcode verfügbar unter <http://sourceforge.net/projects/gazetrackinglib/>

Die Primäraufgabe der Probanden bestand darin auf einer geraden Strecke einem Vorderfahrzeug mit einer Geschwindigkeit von konstant 100 km/h in einer Distanz von 100 m zu folgen und die Spur bestmöglich zu halten. Nach zwei Minuten wurde der zuvor erklärte Anwendungsfall gestartet und dem Probanden nacheinander drei bis vier konkrete Aufgaben gegeben. Zwischen jeder konkreten Aufgabe wurde die Visualisierung in der Datenbrille für 30 Sekunden deaktiviert und der Proband konnte sich ausschließlich auf die Fahraufgabe konzentrieren. Waren alle Aufgaben gelöst, wurde die Simulation gestoppt, der Proband in den nächsten Anwendungsfall instruiert und die zweite Fahrt gestartet. Die Reihenfolge der vier Anwendungsfälle wurde permutiert, um Gewöhnungseffekte zu verhindern.

Die Sekundäraufgaben für die vier Anwendungsfälle lauteten wie folgt.

*Rückspiegel:* Bei diesem Anwendungsfall wurden die Probanden angewiesen insgesamt drei Mal den Rückspiegel zu aktivieren. Hierbei genügte bei den ersten beiden Malen die bloße Aktivierung, beim dritten Mal wurden sie instruiert die Rückspiegelvisualisierung mindestens 12 Sekunden aktiv zu halten.

*Anruf:* Die Probanden wurden mit insgesamt drei Anrufen konfrontiert. Sie wurden instruiert den ersten Anruf anzunehmen, den zweiten Anruf abzuweisen und den dritten Anruf anzunehmen und anschließend aufzulegen.

*Nachrichten:* Hier wurden die Probanden instruiert zunächst durch alle Nachrichten zu blättern. Die zweite Aufgabe bestand darin zur „hellblauen Nachricht“ zu blättern und diese laut vorzulesen. Die Instruktion für die dritte Aufgabe lautete zu der Nachricht zu scrollen, die am schlechtesten ablesbar ist.

*Binary UI:* Bei diesem Anwendungsfall wurden die Probanden aufgefordert vier verschiedene Anwendungen auszuwählen: Zunächst die Kamera (weißer Kreis auf blauem Grund), dann den Musikplayer, anschließend die Telefonapplikation und zuletzt die Anwendung, auf die die Aufmerksamkeit des Probanden nach eigenem Empfinden zuerst gelenkt wurde.

Während der Durchführung der Aufgaben wurden die SDLP, die Standardabweichung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug und die Leistungen in der Sekundäraufgabe (Fehler und Bearbeitungszeit) protokolliert. Nach den vier Testfahrten füllten die Probanden einen Fragebogen aus, in dem sie die allgemeine Benutzbarkeit des Systems bewerteten, die Anwendungsfälle in eine Rangordnung bringen und freie Kommentare zum erlebten System tätigen konnten.

**Ergebnisse** Bezüglich der Fahrdaten unterscheidet sich keines der getesteten Konzepte signifikant von der Vergleichsfahrt (ohne Aufgabe), weder in der Längs- noch in der Querverführung. Für die Spurhaltewerte (SDLP, siehe Abbildung 5.6) ist ein Friedman-Test jedoch signifikant ( $p < 0,05$ ). Paarweise Wilcoxon-Tests ergeben, dass im Durchschnitt signifikant bessere Spurhaltewerte (SDLP) aufgezeichnet wurden wenn die Probanden die Rückspiegel-Aufgaben bearbeiteten als wenn sie die Anruf-Aufgaben bearbeiteten ( $\chi^2(4) = 12,56$ ,  $p < 0,0083$ ).

Das System erreicht in einem qualitativen Usability-Fragebogen eine durchschnittliche Punktzahl von 72,82 (SD=13,47). Dabei wurde eine subjektive Bewertung anhand einiger Kategorien auf einer Likert-Skala von 1 bis 100 vorgenommen. Die Probanden waren hierbei der Meinung, das System sei „intuitiv zu bedienen“ ( $M = 3,55$ ,  $SD = 0,69$ ) und „einfach

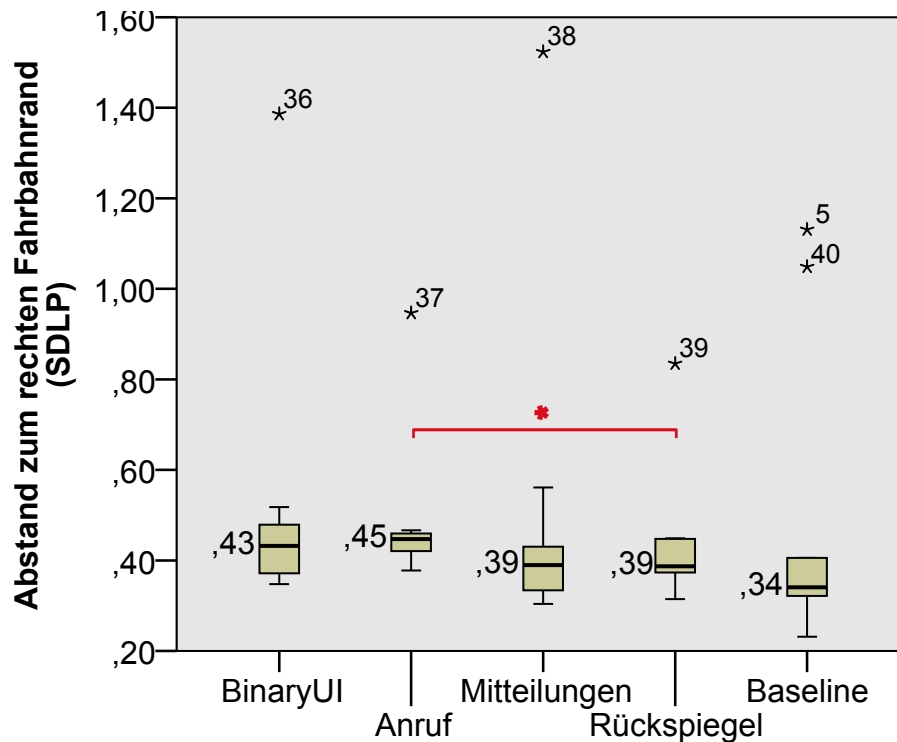


Abbildung 5.6: SDLP-Werte für alle Konzepte.

zu lernen“ ( $M=3,55$ ,  $SD=0,52$ ). Geringere Bewertungen wurden bei der Frage abgegeben, ob die Probanden „eine gute Kontrolle“ über das System hätten ( $M=1,64$ ,  $SD=1,36$ ) und ob sie „genug Feedback“ erhielten ( $M=1,45$ ,  $SD=1,04$ ).

Bei der Analyse der subjektiv empfundenen Auslastung erreicht das System eine mittlere Punktzahl von 53,56 ( $SD=26,80$ ) im NASA RTLX Fragebogen. Besonders viel Auslastung wurde in den Bereichen „körperliche Anforderungen“ ( $M=68,64$ ,  $SD=25,11$ ) und „Anstrengung“ ( $M=68,18$ ,  $SD=28,04$ ) festgestellt.

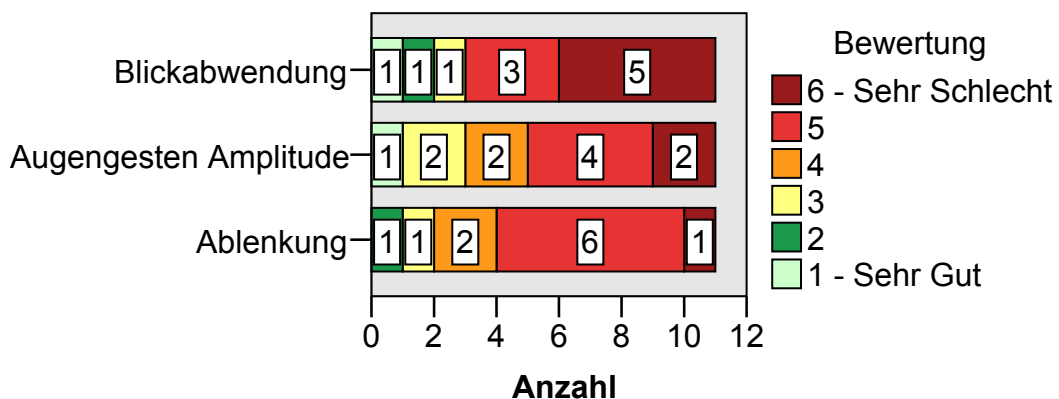
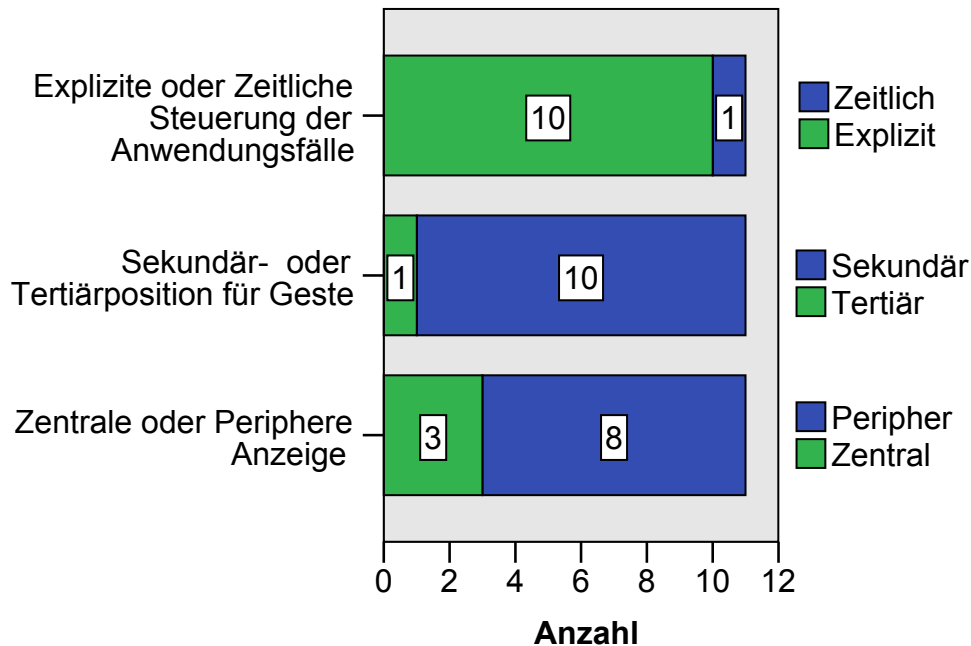


Abbildung 5.7: Subjektive Bewertung des Systems bezüglich Blickabwendung, Ablenkung und der notwendigen Amplitude der Augenbewegung.

Betrachtet man die weiteren Ergebnisse der Fragebögen wird außerdem deutlich, dass die Mehrheit der Probanden das System eher negativ bezüglich der notwendigen Blickabwendung und der potenziellen Ablenkung von der Fahraufgabe sehen (Abbildung 5.7). Außerdem scheint die Amplitude, die für die Augenbewegung notwendig ist, um vom System als Geste erkannt zu werden, zu groß zu sein.



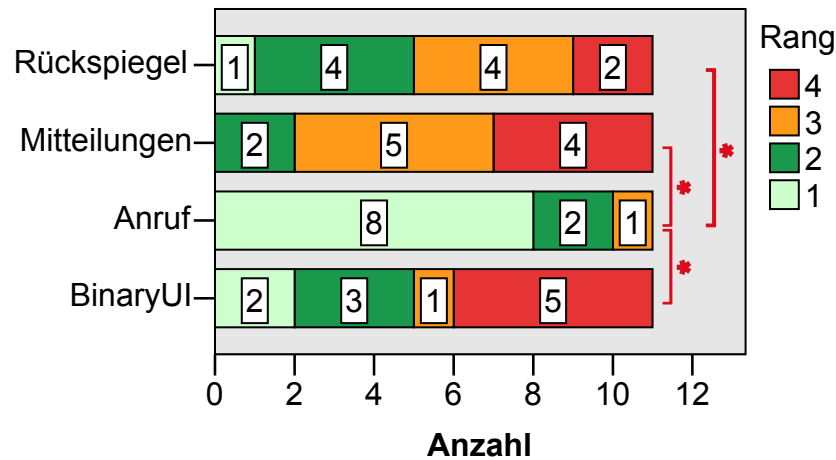
**Abbildung 5.8:** Antworten der Probanden in den subjektiven Fragebögen.

Die Versuchsteilnehmer waren außerdem mehrheitlich der Meinung, dass die Steuerung der Anwendungsfälle ausschließlich explizit erfolgen soll und nicht, wie teilweise umgesetzt, basierend auf einer bestimmten Zeitspanne (beispielsweise die Deaktivierung einer Anzeige). Ebenfalls eindeutig wurden die Sekundärpositionen des Auges gegenüber den Tertiärpositionen für die Durchführung einer Augengeste präferiert. Zuletzt wurde die Informationsanzeige im peripheren Blickfeld von über 70% der Probanden gegenüber der zentralen Informationsanzeige bevorzugt (siehe Abbildung 5.8).

Bei der Rangfolgenbildung der Anwendungsfälle wurde die Reaktion auf einen Anruf am häufigsten favorisiert ( $M=1,36$ ), gefolgt vom Blick in den Rückspiegel ( $M=2,64$ ), dem *Binary UI* ( $M=2,82$ ) und den Mitteilungen ( $M=3,18$ ). Ein Friedman-Test zeigt, dass die Bewertung der Konzepte hier signifikant unterschiedlich ist ( $\chi^2(3)=12,4$ ,  $p<0,01$ ). Paarweise Wilcoxon-Tests zeigten signifikante Unterschiede zwischen dem Anruf-Anwendungsfall und allen anderen Anwendungsfällen ( $p<0,05$ , siehe Abbildung 5.9). Unter Benutzung eines Bonferroni-adjustierten  $\alpha$ -Niveaus ist allerdings lediglich der Vergleich zwischen dem Anruf-Anwendungsfall und den Mitteilungen signifikant ( $p<0,008$ ).

### 5.1.4 Diskussion

Die Auswertung der Fahrdaten konnte kaum signifikante Unterschiede zwischen den Anwendungsfällen offenbaren. Lediglich die Querführung war beim Anruf-Anwendungsfall



**Abbildung 5.9:** Rangfolgenbildung der Anwendungsfälle. Wilcoxon-Vergleiche mit einem p-Wert unter 0,05 sind mit einem (\*) gekennzeichnet.

signifikant schlechter als bei dem Blick in den Rückspiegel. Sogar im Vergleich zu einer Fahrt, bei der überhaupt keine Sekundäraufgabe bearbeitet wurde, gab es keine signifikanten Unterschiede in den Daten. Hierfür ist vermutlich die sehr kleine Stichprobe (N=11) verantwortlich.

Bei Betrachtung der subjektiven Daten wird allerdings deutlich, dass die Probanden den Anruf-Anwendungsfall mit deutlicher Mehrheit als den geeignetsten empfanden. Die trotzdem schlechteren Spurhaltewerte könnten darauf zurückzuführen sein, dass dies die einzige Anzeige war, die System-initiiert ist und nicht aktiv vom Benutzer sichtbar geschaltet wird. In jedem Fall wird angenommen, dass die Anzeige eines bewegten Videobildes ablenkender ist, als die bloße Annahme eines Anrufs. Auch die Ausführung einer Blickgeste, die auf einer tertiären Augenposition beruht, wurde von den Probanden erwartungsgemäß als sehr viel unangenehmer beurteilt als die Verwendung einer Sekundärposition.

Das Ergebnis, dass die Mehrheit der Probanden die Informationsdarstellung in der Peripherie des Blickfelds gegenüber der im Zentrum vorziehen würden, war ebenfalls erwartungskonform. Die kompakte Bauweise der verwendeten Datenbrille in Kombination mit der geringen Auflösung ließ jedoch keine andere Umsetzung zu.

Bemerkenswert ist, dass die Entscheidung bestimmte Interaktionsabläufe durch eine automatische Uhr zu steuern (wie etwa das automatische Durchblättern von Nachrichten oder die Deaktivierung der Rückspiegelanzeige nach einer gewissen Zeit), sehr negativ aufgenommen wurde. Allerdings wird aus den Daten nicht ersichtlich ob diese Bewertung für alle zeitgesteuerten Aktionen gültig ist oder nur für einen Teil (beispielsweise das automatische Durchblättern von Mitteilungen). Auch ist nicht klar ob der gefühlte Kontrollverlust durch die ungewohnte Interaktionsmodalität verstärkt wurde.

In diesem Kapitel wurde eine Möglichkeit zur Blickgesteninteraktion mit Inhalten in einer Datenbrille konzipiert, umgesetzt und mit einer relativ kleinen Stichprobe (N=11) evaluiert. Die Anwendungsfälle wurden zwar so konzipiert, dass unterschiedlich komplexe Interaktionsabläufe, Augenbewegungen mit unterschiedlichem physischem Aufwand (Sekundär- und Tertiärposition) sowie verschiedene Dialogtechniken (nutzer- beziehungsweise systeminitiiert) untersucht werden konnten. Dennoch kann an dieser Stelle kein abschließen-



des Urteil über die Eignung von Blickgesten für die Bedienung von Sekundäraufgaben während der Fahrt gefällt werden. Zumindest die hier evaluierte Umsetzung von blickgestenbasierter Interaktion im Fahrzeug wurde von den Probanden jedoch eher negativ aufgefasst. Unter der Prämisse, dass im Fahrzeug zudem eine Vielzahl von ergonomisch optimal angeordneten Bedienelementen (beispielsweise am Lenkrad) zur Verfügung steht, wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass die Benutzung von Blickgesten keinen Vorteil bei der Interaktion mit Inhalten in der Datenbrille bereitstellt. Selbst in den einfachsten Anwendungsfällen (beispielsweise die Annahme eines Anrufs) wäre ein Druck auf einen Knopf des Multifunktionslenkrads einfacher, weniger fehleranfällig und komfortabler als eine mehrheitlich als unangenehm empfundene Pupillenbewegung zur Seite.

Da die Datenbrille sich unmittelbar vor den Augen des Fahrers befindet, könnte ein Sensor zur Blickerfassung relativ einfach integriert werden. Auch wenn die Bedienung von Inhalten in der Datenbrille durch Blickgesten zunächst attraktiv wirkt, so konnten in dieser Studie keine Vorteile dieser Interaktionsmodalität identifiziert werden. Auch wenn mit einer kleinen Probandenstichprobe keine negativen Effekte auf das Fahrverhalten gemessen werden konnten, wurde durch die subjektiven Einschätzungen der Versuchspersonen deutlich, dass diese Art der Interaktion vermutlich zu ablenkend für die Nutzung während der Fahrt ist.

## 5.2 Zeige- und Touchgesten vor der Mittelkonsole

Kapitel 5.2 basiert auf der Publikation: F. Lauber, A. Follmann und A. Butz. What You See Is What You Touch: Visualizing Touch Screen Interaction in the Head-Up Display. Erschienen in *Proceedings of the conference on Designing interactive systems (DIS)*, Seiten 171–180. ACM, 2014. [88]. Der Publikation liegt die Masterarbeit „Entwicklung, Umsetzung und Evaluation neuartiger Bedienkonzepte mittels indirekter Touch- und Gesten-Interaktion für das Head-Up Display im Fahrzeug“ von Anna Follmann zugrunde. Themenstellung, das grundsätzliche Anzeige- und Bedienkonzept sowie die Betreuung der Arbeit wurde von Felix Lauber geleistet. Weitere Konzeptvarianten, die Programmierung des Prototypen, Durchführung und Auswertung der Studie stammen von Anna Follmann.

Wie schon die Interaktion mittels Blickgesten (Kapitel 5.1), ist auch das in diesem Kapitel beschriebene Konzept primär durch die Vermeidung unnötiger Kopfdrehungen in Richtung klassischer Anzeigeorte im Fahrzeug motiviert. Ein Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug, bei dem die visuelle Ablenkung aufgrund hoher Blickzeiten und fehlendem haptischen Feedback als sehr hoch eingeschätzt wird, ist die Bedienung von Touchscreens (siehe Kapitel 2.1.4). Dennoch finden sich diese sehr oft in aktuellen Fahrzeugen wieder. Verantwortlich hierfür ist ein starkes Bedürfnis seitens der Nutzer die ihnen bekannten Interaktionsformen aus der Unterhaltungsindustrie (beispielsweise durch die Verwendung von Smartphones und Tablet-Computer) auch im Fahrzeug zu verwenden. Ein Touchscreen ist außerdem sehr flexibel erweiterbar (beispielsweise durch neue Grafiken) und bietet ein sehr hohes Maß an Individualisierbarkeit für den Endnutzer.

Der Grundgedanke für das nachfolgende Konzept ist die Bedienung eines Touchscreens nach wie vor am Bildschirm selbst vorzunehmen, die Inhalte selbst jedoch auf einer Datenbrille anzuzeigen. Aus der HUD-Forschung ist bekannt, dass die Anzeigeposition nahe an der Fahrszene mit einer auf etwa in drei Metern Distanz liegenden Projektionsfläche Vorteile beim Fokuswechsel zwischen Fahrszene und Anzeigen hat (siehe Kapitel 2.2). Bei entsprechender technischer Reife gilt dieser Vorteil auch für eine Datenbrille: schließlich kann hiermit theoretisch ein HUD perfekt imitiert und sowohl Anzeigort als auch die Projektionsdistanz identisch gestaltet werden. Es ist zu erwarten, dass die Entkopplung von Interaktions- und Anzeigort auf einem Touchscreen sich zunächst einmal nachteilig auswirkt. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Interaktion mit dem Touchscreen „blind“ erfolgt [148]. Allerdings sollte die Bedienung einer Sekundäraufgabe während der Fahrt nicht isoliert bewertet werden, sondern stets das komplette Zusammenspiel zwischen Fahr- und Nebenaufgabe. Profitiert die Fahraufgabe mehr von einer solchen Trennung, als die Bedienung der Nebenaufgabe darunter leidet, könnte dies eine interessante Alternative für die Interaktion mit Touchscreens während der Fahrt darstellen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die indirekte Bedienung (während der Fahrt) nahtlos mit einer direkten Interaktion (zum Beispiel im Stand) kombiniert werden kann.

Die Bedienung eines Touchscreens ist allerdings zunächst einmal nicht möglich, ohne den Blick auf die Bedienhand zu richten. Die Verwendung von Zeigegestik löst dieses Problem jedoch. Wird die Position der Hand, beziehungsweise des zeigenden Fingers, vor dem Bildschirm erfasst, so kann zunächst ein Zeigevektor (beispielsweise vom Zeigefinger zum Bildschirm) berechnet werden. Anschließend kann der Schnittpunkt dieses Vektors mit dem Bildschirm bestimmt und gemeinsam mit dem Bildschirminhalt auf der Datenbrille angezeigt werden. Dieser Schnittpunkt kann wie ein Cursor dargestellt werden und dem Nutzer in Echtzeit anzeigen, an welchem Punkt der Finger den Bildschirm berührte, würde er entlang des Zeigevektors bis zum Bildschirm weitergeführt werden.

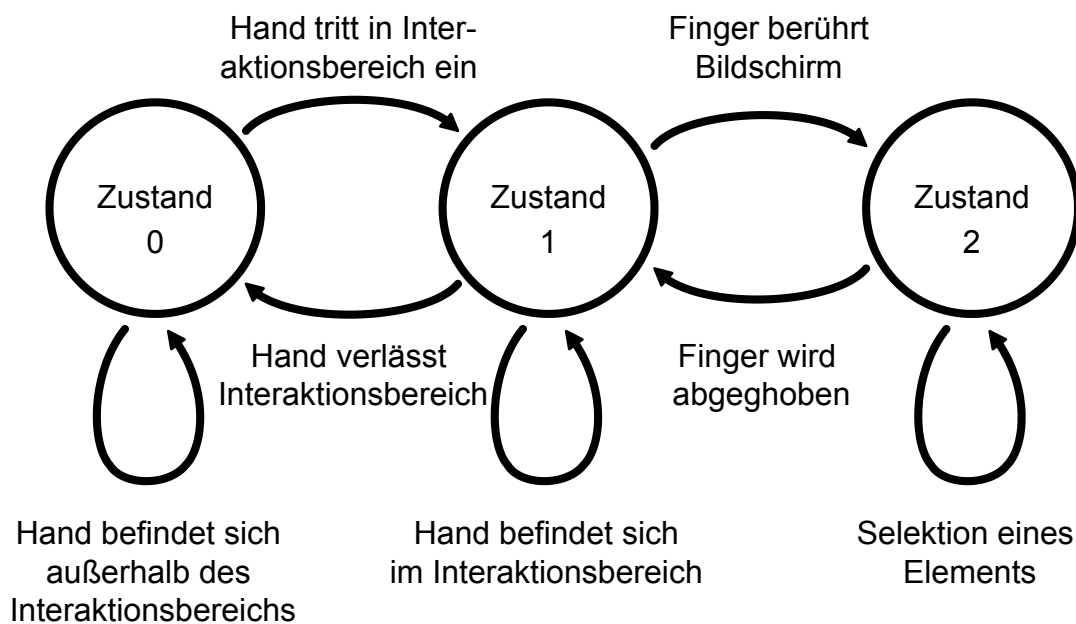
Der Benutzung von Gesten im Fahrzeug wird immer mehr Aufmerksamkeit in der Forschung gewidmet, da das Potenzial besteht das Blickverhalten des Fahrers positiv zu beeinflussen [121]. In einer Arbeit von Pickering et al. wird zwischen *präemptiven*, *funktionsassoziierten*, *kontextsensitiven*, *globalen Shortcut* sowie *natürlichen Dialog* Gesten unterschieden [121]. Eine präemptive Geste wird dabei dadurch charakterisiert, dass die Annäherungsrichtung der Hand hin zu einem bestimmten Bedienelement genutzt wird, um die Absicht des Fahrers mit diesem zu interagieren zu erkennen und ihn dabei entsprechend zu unterstützen. Zu der Klasse der präemptiven Zeigegesten zählen auch die in dem, im letzten Absatz beschriebenen, Grundkonzept verwendeten Gesten. Sie werden verwendet, um den Berührungspunkt auf dem CID zu präzisieren und entsprechend zu visualisieren.

### 5.2.1 Vorüberlegungen

**Basiskonzept - Systemzustände und Interaktion** Für das System können drei Grundzustände definiert werden (siehe Abbildung 5.10). Interagiert der Fahrer nicht mit dem System, befindet es sich in einem inaktiven Grundzustand (Zustand 0). Denkbar wäre, dass die Anzeigen auf der Datenbrille in diesem Zustand den Fahrer bei der Fahraufgabe unterstützen und beispielsweise die aktuelle Geschwindigkeit oder Navigationsanweisungen darstellen. Bewegt der Fahrer nun seine Hand in den Bereich vor dem CID, in dem die

Gesten erkannt werden (in Abbildung 5.10 als „Interaktionsbereich“ bezeichnet), werden die CID-Inhalte auf der Datenbrille angezeigt und die Fingerposition relativ zum Display visualisiert (Zustand 1). Ein Element wird selektiert, indem der Finger in Richtung des CID bis zu dessen Berührung weiterbewegt wird (Zustand 3).

Da dieses System im zweiten Fall einen Zustand definiert, in dem der Finger zwar vom System erfasst wird, jedoch noch keine endgültige Auswahl eines Elements getroffen wird, wird in dem Basiskonzept ein dreistufiges Zustandsmodell nach Buxton [25] implementiert. Abgeleitet von diesem Basiskonzept werden nun verschiedene Konzeptvarianten entwickelt.



**Abbildung 5.10:** Zustandsdiagramm des Systems. Abbildung in Anlehnung an [25].

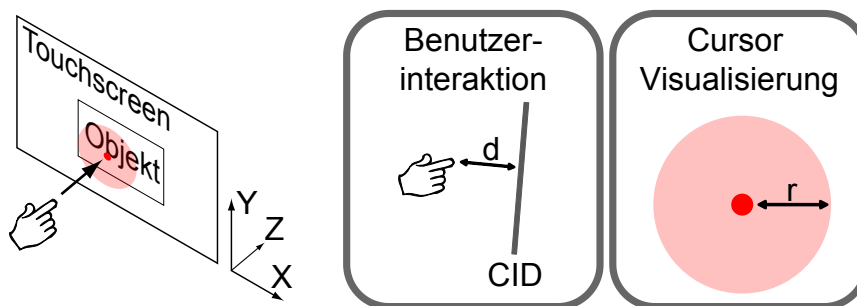
**Kontaktbasierte und Kontaktlose Suche** Für den Systemzustand 2, in dem der Nutzer mithilfe der Anzeige auf der Datenbrille den Punkt auf dem Bildschirm sucht, den er auch für eine tatsächliche Berührung (und damit Selektion) in Betracht gezogen hat, wurden zwei unterschiedliche Umsetzungen in Betracht gezogen. Neben der kontaktlosen Variante, die bereits im Basiskonzept beschrieben wurde, wurde auch eine kontaktbasierte Variante entwickelt. Die in [148] beschriebenen negativen Effekte der feedbacklosen Interaktion sollten dadurch vermieden werden. In dieser Umsetzungsvariante ist keine Positionserfassung *vor* dem Bildschirm notwendig. Stattdessen berührt der Nutzer im Zustand 2 ständig den Bildschirm, während er den Cursor in der Datenbrillenvisualisierung durch verschieben des Fingers auf dem Display bewegt. Für eine Differenzierung zu Zustand 3 und der damit verbundenen Selektion eines Elements auf dem Bildschirm wurde hierbei das Abheben des Fingers vom Bildschirm (die sogenannte „lift-off“-Strategie) beziehungsweise die Hinzunahme einer zusätzlichen Modalität (Taste auf dem Lenkrad) in Betracht gezogen.

**Nutzung des Raumes vor dem CID** Im Falle einer kontaktlosen Umsetzung des Zustands 2 kann der Nutzer seine Hand innerhalb eines dreidimensionalen Koordinatensystems frei vor dem Bildschirm bewegen. Dabei wird die Bewegung entlang der beiden

Achsen des Bildschirms direkt auf eine Cursor-Position in der Datenbrille übertragen. Es ist jedoch auch wichtig eine visuelle Rückmeldung des Systems über die Bewegung zum Bildschirm hin und davon weg darzustellen [148]. Zwei Alternativen wurden hierfür konzipiert.

Zunächst wurde eine **Cursor-Visualisierung** entwickelt, die in der Lage ist auch die Bewegung entlang der Z-Achse darzustellen (siehe Abbildung 5.11). Hierfür wird die Standard-Cursor-Visualisierung (roter Punkt) durch einen kreisförmigen, halbtransparenten Bereich erweitert. Dessen Radius hängt linear von der Distanz zwischen der Hand des Benutzers und dem Bildschirm ab und wird größer, je größer diese Distanz ist.

In einer kleinen Nutzerstudie mit sechs Teilnehmern bevorzugten alle Teilnehmer diese Cursor-Visualisierung im Vergleich zu einer einfachen Punkt-Visualisierung, mit der nur zwei Freiheitsgrade abgebildet werden können.



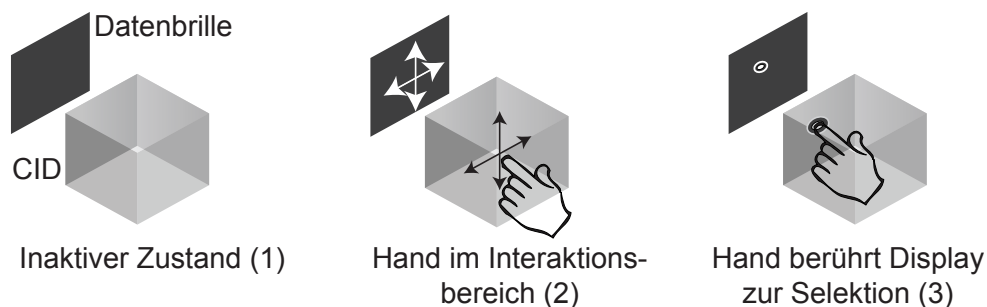
**Abbildung 5.11:** Cursor-Visualisierung mit Radius ( $r$ ) in Abhängigkeit von der Distanz ( $d$ ) zum Bildschirm.

Eine alternative Feedback-Variante wurde durch eine **dynamische Skalierung (Zoom)** des Inhalts bei Annäherung des Fingers realisiert. Hier hängt die Darstellungsgröße auf der Datenbrille linear von der Distanz zwischen dem Finger des Anwenders und dem Bildschirm ab. Mit kleiner werdender Distanz zwischen Bildschirm und Anwenderhand wird hierbei eine größere Darstellung (Skalierungsfaktor zwischen 1.0 und 2.0) gewählt. Ein ähnliches Verfahren wurde bereits von Laquai et al. erfolgreich bei direkter Touch-Interaktion mit Annäherungsgestik umgesetzt, um die Zielgenauigkeit bei Touch-Interaktion zu verbessern [79]. Während Bewegungen der Hand in Richtung des Displays und entgegengesetzt sich unmittelbar auf die Skalierung der Inhalte auswirkten, hatten Bewegungen entlang der beiden anderen Freiheitsgrade eine Veränderung des Bildausschnitts zur Folge. Im Unterschied zur genannten Arbeit von Laquai et al. wurde das Zooming bei den folgenden Konzepten lediglich in der Visualisierung in der Datenbrille vorgenommen. Dies hat zum einen zur Folge, dass der von Laquai et al. genutzte Vorteil der verbesserten Zielgenauigkeit für die Fingerberührung nicht zum Tragen kommt. Andererseits wird so gewährleistet, dass eine herkömmliche Bedienung des Touchscreens immer noch möglich ist. Neben einer kontinuierlichen Übersetzung von der Distanz zwischen Finger und Bildschirm und dem Skalierungsfaktor der Anzeige in der Datenbrille, wurden auch Varianten entwickelt, in denen die Inhalte mehreren diskreten Schritten skaliert werden. In einer kleinen Nutzerstudie ( $N=6$ ) setzte sich eine kontinuierliche Abbildung zwischen Distanz und Größe gegenüber Varianten mit diskreten Vergrößerungsschritten jedoch deutlich ( $N=5$ ) durch.

## 5.2.2 Konzeptvarianten

Ausgehend von diesen Vorüberlegungen wurden vier Konzeptvarianten erarbeitet.

**Hover and Touch** Der Interaktionsablauf der ersten Konzeptvariante, *Hover and Touch* genannt, funktioniert wie im Basiskonzept beschrieben. Die Visualisierung auf der Datenbrille wird aktiviert, sobald der Finger des Nutzers in den Interaktionsbereich eindringt. Die Suche nach dem auszuwählenden Element erfolgt kontaktlos mit der entsprechenden Cursorvisualisierung auf der Datenbrille. Die Auswahl eines Elements wird durch Berühren des Touchscreens vorgenommen (siehe auch Abbildung 5.12).



**Abbildung 5.12:** Systemverhalten des Konzepts *Hover and Touch*.

Wird die Abwesenheit der Hand im Trackingbereich erkannt, wird nach dem Ablauf von 1 Sekunde die Visualisierung auf der Datenbrille wieder deaktiviert, beziehungsweise in ihren Grundzustand zurückgesetzt. Wird innerhalb dieser Zeit erneut die Anwesenheit der Hand im Interaktionsbereich festgestellt, so wird die Anzeige in der Datenbrille nicht deaktiviert.

Da diese Konzeptvariante eine kontaktlose Suche implementiert, wurde hiervon eine Variante mit Zoom und eine Variante ohne Zoom implementiert.

**Hover and Click** Die zweite Konzeptvariante, die eine kontaktlose Suche unterstützt, ist *Hover and Click*.



**Abbildung 5.13:** Systemverhalten des Konzepts *Hover and Click*.

Ein Interaktionsablauf ist identisch zu *Hover and Touch*, mit dem einzigen Unterschied, dass ein Element durch einen Tastendruck am Lenkrad ausgewählt wird (siehe Abbildung 5.13).

Die Hinzunahme der zusätzlichen Interaktionsmodalität erfordert also die Hinzunahme einer zweiten Hand, im Gegenzug entfällt jedoch die Notwendigkeit der Berührung des Touchscreens vollständig.

Da auch diese Konzeptvariante eine kontaktlose Suche implementiert, wurde ebenfalls eine Variante mit Zoom und eine Variante ohne Zoom implementiert.

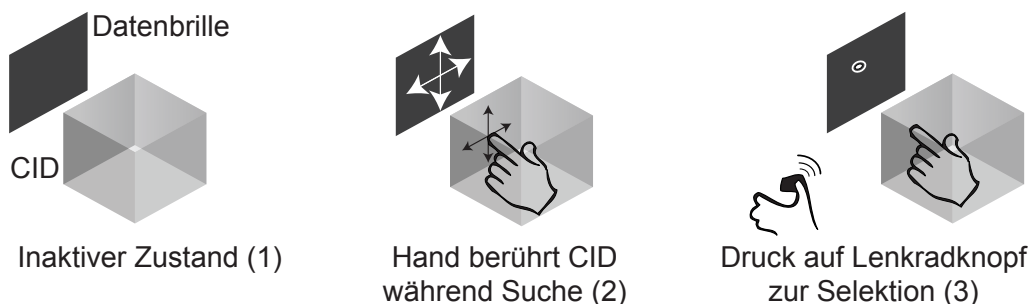
**Slide and Lift** In der dritten Konzeptvariante, *Slide and Lift*, wird auf eine Positionserfassung der Hand vor dem Touchscreen vollständig verzichtet. Die Anzeige der Inhalte auf der Datenbrille wird aktiviert, sobald der Nutzer mit seinem Finger den Touchscreen berührt. Durch Bewegen des Fingers kann nun nach einem Element gesucht werden, wobei der Kontakt mit dem Bildschirm jedoch ständig aufrechterhalten werden muss. Sobald sich der Finger auf dem gewünschten Element befindet, kann dieses durch Abheben (*lift-off*) des Fingers selektiert werden (siehe Abbildung 5.14).



**Abbildung 5.14:** Systemverhalten des Konzepts *Slide and Lift*.

Da diese Konzeptvariante eine kontaktbasierte Suche implementiert, wird hier keine Variante mit Zoom unterstützt. Auch auf die Nutzung des erweiterten Cursors wurde verzichtet.

**Slide and Click** Ein Interaktionsablauf in der dritten Konzeptvariante, *Slide and Click*, ist mit dem von *Slide and Lift* identisch, mit dem Unterschied, dass ein Element nicht über das Abheben des Fingers ausgewählt wird, sondern über einen Tastendruck auf dem Lenkrad mit der anderen Hand (siehe Abbildung 5.15).



**Abbildung 5.15:** Systemverhalten des Konzepts *Slide and Click*.

Erneut implementiert dieses Konzept eine kontaktbasierte Suche. Daher wird ebenfalls weder eine Zoomvariante noch die erweiterte Cursorvisualisierung eingesetzt.

### 5.2.3 Anwendungsfall und Prototyp

**Anwendungsfall** Als beispielhafter Anwendungsfall für diese Art der Interaktion wurde die manuelle Eingabe von Städtenamen auf einer „QWERTZ“-Tastatur umgesetzt. Dieser Anwendungsfall besitzt eine relativ hohe Komplexität und eignet sich somit vermutlich nicht für die Anzeige auf einer Datenbrille. Diese Entscheidung wurde jedoch bewusst getroffen, um eventuell existierende Unterschiede zwischen den Konzeptvarianten besser identifizieren zu können. Außerdem handelt es sich hierbei um eine allgemein bekannte und leicht verständliche Aufgabe, die auch von Versuchspersonen ohne besondere Vorkenntnisse durchgeführt werden kann. Zusätzlich verfügt dieser Anwendungsfall über eine zweidimensionale Anordnung von Elementen (im Gegensatz beispielsweise zu einer Liste), so dass die Interaktion in alle möglichen Freiheitsgrade erforderlich wird. Durch die relativ hohe Dichte von Elementen können zu guter Letzt auch Konzeptvarianten mit Zoom-Funktion sinnvoll umgesetzt werden.

**Prototyp** Für die Anzeige der CID-Inhalte wurde eine fahrzeugstabile Positionierung gewählt. So befinden sich die Inhalte, wie bei einem HUD, immer an einer festen Position und negative Wechselwirkungen mit einem sich aufgrund der Kopfbewegungen ständig verändernden Hintergrund können ausgeschlossen werden.

Da die technologische Unreife der verfügbaren Komponenten immer noch zu Problemen bei der fahrzeugstabilen Darstellung von Inhalten in der Datenbrille führt, wurde ein HUD Prototyp für die Konzeptumsetzung und die beiden folgenden Studien verwendet. Somit können die folgenden Studienergebnisse erst auf die Verwendung einer Datenbrille übertragen werden, wenn eine entsprechende technologische Reife sowohl der Brillen- als auch der Trackingsysteme erreicht ist.

### 5.2.4 Vorstudie: Vergleich der Konzeptvarianten

Um Erkenntnisse über die unterschiedlichen Zoom- und Interaktionsvarianten zu gewinnen, wurden die erarbeiteten Konzeptvarianten in einer Vorstudie miteinander verglichen.

**Aufbau** Die Probandenstudie wurde unter Benutzung des in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Tischaufbaus mit HUD-Prototyp durchgeführt. Als Touchscreen wurde ein entsprechend rechts vom Probanden positionierter Lenovo X201 Tablet-Computer verwendet (12,1 Zoll Bilddiagonale). Etwa 65 cm darüber wurde eine mit dem Sensor nach unten gerichtete Microsoft Kinect 2 montiert, welche die Positionsbestimmung der Hand vor dem Touchscreen vornahm (siehe Abbildung 5.16).

**Stichprobe** An der Vorstudie nahmen insgesamt 30 Versuchspersonen teil, davon waren 22 männlich und acht weiblich. Neunundzwanzig der 30 Probanden waren Rechtshänder, alle Versuchspersonen gaben an ein Gerät mit Touchscreen (z.B. Smartphone) zu besitzen und dieses regelmäßig zu benutzen. Die Studienteilnehmer waren zwischen 19 und 53 Jahren alt ( $M=30,0$ ,  $SD=7,2$ ) und übten ausnahmslos eine berufliche Tätigkeit mit technischem Schwerpunkt aus.



**Abbildung 5.16:** Aufbau in der Hauptstudie. Links der Hardware-Aufbau, rechts die Fahrerperspektive durch das HUD auf die Fahrszene.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Nach der Begrüßung, der Aufnahme der demographischen Daten und einer etwa fünfminütigen Eingewöhnungsfahrt, wurden die Probanden gebeten in der Sitzkiste Platz zu nehmen und den Sitz so einzustellen, dass komfortables Fahren und die Touch-Interaktion mit dem Bildschirm problemlos möglich waren. Alle Versuchspersonen wurden mit jeder Systemvariante konfrontiert (Within-Subjects Design), so dass außer der Eingewöhnungsfahrt insgesamt sechs Messfahrten zu absolvieren waren (siehe Abbildung 5.17). Vor jeder Messfahrt wurde jedem Probanden das nachfolgende Konzept erklärt und mit ihm eingeübt.

		Interaktion - Suche	
		Kontaktlos	Kontaktbasiert
Interaktion - Auswahlmodalität	Touch	Hover and Touch	Slide and Lift
		Hover and Touch Zoom	x
	Lenkradknopf	Hover and Click	Slide and Click
		Hover and Click Zoom	x

**Abbildung 5.17:** Die sechs Bedingungen in der Vorstudie.

Die Fahraufgabe in der Vorstudie bestand darin, einem Vorderfahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h zu folgen und dabei einen möglichst konstanten Abstand von 100 m zu halten. Die gesamte Fahrt fand auf der rechten Spur einer dreispurigen Autobahn mit gerader Streckenführung statt. Während der Fahrt wurden die Probanden aufgefordert eine Nebenaufgabe zu bearbeiten. Sie bestand darin, nacheinander die vier deut-



schen Städtenamen „Frankfurt“, „Stuttgart“, „Chemnitz“ und „Berlin“ mittels der Tastatur in das System einzugeben. Die Probanden wurden dabei instruiert sich primär auf die Fahraufgabe zu konzentrieren, allerdings die Nebenaufgabe trotzdem so korrekt und schnell wie möglich zu absolvieren. Neben der Qualität der Längs- und Querführung des Fahrzeugs wurden außerdem die Leistungen in der Sekundäraufgabe (Fehler und Bearbeitungszeit) gemessen. Die Bedienzeit der Sekundäraufgabe wurde dabei in die durchschnittliche Zeit pro Buchstabenanschlag umgerechnet, um die unterschiedliche Wortlänge der Städtenamen zu kompensieren. Außerdem füllten alle Versuchspersonen am Ende jeder Fahrt einen Fragebogen aus, in dem jedes Konzept bezüglich der subjektiv empfundenen Arbeitsbelastung und einigen speziell für diesen Versuch ausgelegten Kriterien beurteilt werden konnte. Nach Beendigung aller Fahrten wurde zudem ein Abschlussfragebogen ausgefüllt, in dem unter anderem die erlebten Konzepte in eine Rangfolge eingeordnet wurden.

**Ergebnisse** Die Fahrdaten wurden über die Dauer einer gesamten Fahrt ausgewertet, nicht nur in den Abschnitten, in denen tatsächlich auch mit dem System interagiert wurde. Da die Bearbeitungszeiträume für die Nebenaufgabe jedoch unmittelbar aufeinanderfolgten, wurden bezüglich der Standardabweichung der durchschnittlichen Geschwindigkeit ( $\chi^2(5)=27,14$ ,  $p<0,05$ ) und der SDLP ( $\chi^2(5)=60,53$ ,  $p<0,05$ ) dennoch signifikante Unterschiede zwischen den Konzeptvarianten festgestellt (Friedman-Tests). Auch bezüglich der Bearbeitungszeit für die Nebenaufgabe ( $\chi^2(5)=71,49$ ,  $p<0,05$ ) sowie der Fehleranzahl bei deren Bearbeitung ( $\chi^2(5)=64,4$ ,  $p<0,05$ ) wurden signifikante Unterschiede zwischen den Konzeptvarianten festgestellt. Um festzustellen, zwischen welchen Konzepten die Unterschiede bestehen, wurden paarweise t-Tests für verbundene Stichproben beziehungsweise paarweise Wilcoxon-Tests durchgeführt.

Die erste Frage, die durch die Studie beantwortet werden sollte, war, ob die **kontaktlose oder kontaktbasierte** Suche eines Elements die Interaktion besser unterstützen beziehungsweise die Primäraufgabe weniger stören würde. Hier konnte aufgrund der vorliegenden Daten keine eindeutige Antwort gefunden werden. Bei der Beantwortung dieser Frage ist lediglich der Vergleich zwischen *Hover and Click* und *Slide and Click* relevant, da dies der einzige Systemvergleich ist bei dem sich die beiden Systeme lediglich bezüglich der Auswahlphase unterscheiden. Bei den SDLP-Werten erreichte das Konzept *Slide and Click* (Med=0,43 m) minimal bessere Werte als *Hover and Click* (Med=0,44 m), ebenso wie bei der Standardabweichung der durchschnittlichen Geschwindigkeit (*Slide and Click* mit Med=27,81 km/h, *Hover and Click* mit Med=28,76 km/h). Bei der Interaktion mit *Slide and Click* wurden auch weniger Fehler gemacht (Med=0) als mit *Hover and Click* (Med=0,5) und die durchschnittliche Zeit pro Tastendruck ist etwas kürzer (*Slide and Click* mit Med=1,6 s, *Hover and Click* mit Med=1,8 s). Auch die subjektiv empfundene Auslastung ist etwas geringer mit dem Konzept *Slide and Click* (M=48,9) als mit der kontaktlosen Variante *Hover and Click* (M=51,2). Keiner dieser Unterschiede ist jedoch signifikant (Bonferroni-korrigiertes Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,003$ ).

Ein weiteres Ziel der ersten Studie war herauszufinden, wie sich die Hinzunahme der zusätzlichen Modalität in Form des **Lenkradknopfes zur Selektion** von Elementen auf die abhängigen Variablen auswirken würde. Für die Beantwortung dieser Frage ist der Vergleich von *Hover and Click* und *Hover and Touch* von Interesse, ebenso wie der zwischen den Systemen *Hover and Click Zoom* und *Hover and Touch Zoom*. Während es bezüglich der SDLP keinen signifikanten Unterschied zwischen den Konzepten *Hover and Click* (Med=0,44 m) und *Hover and Touch* (Med=0,46 m) gibt, unterscheiden sich die Konzepte

*Hover and Click Zoom* (Med=0,49 m) und *Hover and Touch Zoom* (Med=0,56 m) signifikant voneinander ( $z=2,64$ ,  $p<0,003$ ). Der Eindruck, dass die Verwendung der Lenkradtaste als Auswahlmodalität besser abschneidet als die Auswahl mittels Berührung, bestätigt sich auch bei Betrachtung der Sekundäraufgabe. Die durchschnittliche Zeit für das Drücken einer Taste ist bei *Hover and Touch* (Med=2,5 s) signifikant länger als bei *Hover and Click* (Med=1,8 s,  $z=3,62$ ,  $p<0,003$ ), genauso wie für *Hover and Touch Zoom* (Med=3,0 s) im Vergleich zu *Hover and Click Zoom* (Med=2,2 s,  $z=2,66$ ,  $p<0,003$ ). Die subjektiv empfundene Auslastung ist etwas höher für das Konzept *Hover and Touch Zoom* ( $M=78,3$ ) im Vergleich zu *Hover and Click Zoom* ( $M=66,5$ ), sowie für das Konzept *Hover and Touch* ( $M=64,5$ ) im Vergleich zu *Hover and Click* ( $M=51,2$ ). Keiner dieser Unterschiede ist jedoch statistisch signifikant. Auch die Standardabweichung der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeit ist für das Konzept *Hover and Touch* (Med=25,2 km/h) nur etwas geringer als bei der Interaktion mit *Hover and Click* (Med=28,8 km/h) genauso wie bei Benutzung des Konzepts *Hover and Touch Zoom* (Med=23,2 km/h) im Vergleich zu *Hover and Click Zoom* (Med=25,7 km/h). Auch diese Unterschiede sind nicht signifikant.

Zuletzt sollte durch die erste Studie geklärt werden, ob sich die **Zooming-Funktionalität** bei den Konzeptvarianten mit kontaktloser Suche vorteilhaft auf die Systembedienung auswirken würde. Hierzu werden die Konzepte *Hover and Click Zoom* und *Hover and Click*, sowie *Hover and Touch Zoom* und *Hover and Touch* mittels paarweisen Wilcoxon-Tests verglichen. Zunächst können hier signifikant schlechtere SDLP-Werte für *Hover and Touch Zoom* (Med=0,56 m) im Vergleich zu *Hover and Touch* (Med=0,46 m,  $z=3,62$ ,  $p<0,003$ ) sowie für *Hover and Click Zoom* (Med = 0,49) im Vergleich zu *Hover and Click* (Med=0,44 m,  $z=1,92$ ,  $p<0,003$ ) festgestellt werden. Auch bei der Nebenaufgabe wurde ein durchschnittlicher Tastendruck unter Verwendung von *Hover and Touch Zoom* (Med=2,98 s) signifikant langsamer getätigt als bei *Hover and Touch* (Med=2,47,  $z=2,64$ ,  $p<0,003$ ). Genauso offenbarte ein Vergleich zwischen *Hover and Click Zoom* (Med=2,17 s) und *Hover and Click* (Med=1,77 s) hier einen signifikanten Unterschied ( $z=2,92$ ,  $p<0,003$ ). Auch die subjektiv empfundene Auslastung ist bei *Hover and Click Zoom* ( $M=66,53$ ) signifikant höher als bei *Hover and Click* ( $M=51,17$ ,  $p<0,003$ ), ebenso wie bei *Hover and Touch Zoom* ( $M=78,27$ ) im Vergleich zu *Hover and Touch* ( $M=64,53$ ,  $p<0,003$ ). Bezüglich der Fehlerrate existieren allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen *Hover and Touch* (Med=4) und *Hover and Touch Zoom* (Med=3,5) oder zwischen *Hover and Click* (Med=0,5) und *Hover and Click Zoom* (Med=0,5). Auch die Standardabweichung der durchschnittlichen Geschwindigkeit des Fahrzeugs unterscheidet sich bei den Konzepten *Hover and Touch Zoom* (Med=23,2 km/h) beziehungsweise *Hover and Click Zoom* (Med=25,7 km/h) nicht signifikant von den Konzeptvarianten *Hover and Touch* (Med=25,2 km/h) beziehungsweise *Hover and Click* (Med=28,8 km/h).

Auch die subjektive Ablenkung ist bei den Varianten *Hover and Click* (Med=4,0) und *Slide and Click* (Med=3,0) von allen Varianten am geringsten (Skala von 1=“Sehr gering“ bis 6=“Sehr hoch“). Signifikante Unterschiede (paarweise Wilcoxon Tests mit  $\alpha = 0,003$ ) zu anderen Konzepten wurden bei beiden Varianten aber lediglich im Vergleich mit *Hover and Click Zoom* (Med=5,0) beziehungsweise *Hover and Touch Zoom* (Med=6,0) festgestellt. Bei einer Rangfolgenbildung der Konzepte wurde *Slide and Click* auch am häufigsten von den Probanden als bestes Konzept gewählt ( $N=15$ ), am zweithäufigsten das Konzept *Hover and Click* ( $N=8$ ), gefolgt von *Slide and Lift* ( $N=6$ ). Bei der Durchführung paarweise Wilcoxon-Tests offenbart, dass die Rangfolge für das Konzept *Slide and Click* (Med=1,5)

sogar signifikant besser war als alle übrigen Konzepte ( $\alpha = 0,003$ ). Das Konzept *Hover and Click* (Med=2,0) wurde immer noch signifikant besser eingeordnet als *Hover and Touch* (Med=4,0) und die beiden Zoom-Konzepte.

**Diskussion** Nach der Entwicklung der Konzeptvarianten, in denen unterschiedliche Interaktionsarten zur Suche (kontaktlos beziehungsweise kontaktbasiert) und Auswahl (Lenkradtaste beziehungsweise direkte Berührung), sowie zwei verschiedene Arten der visuellen Rückmeldung über die Distanz zwischen Finger und Bildschirm (Zoom beziehungsweise spezieller Cursor) zum Einsatz kamen, wurden diese in einer Probandenstudie gegenübergestellt. Um zu vermeiden, dass die unreife Technologie der Datenbrille beziehungsweise des Kopftrackers als konfundierender Faktor auftritt, wurde für die Darstellung der Konzepte ein HUD-Aufbau verwendet.

Zunächst wird festgestellt, dass die Hinzunahme einer zusätzlichen Modalität (Lenkradknopf) sich durchweg positiv auf die hier gemessenen Daten auswirkt. Im Vergleich zu einer Auswahl mittels direkter Berührung schneidet diese Auswahlvariante besonders bei der Bearbeitungsgeschwindigkeit der Sekundäraufgabe, sowie bei der subjektiv empfundenen Arbeitsbelastung signifikant besser ab. Dies wiederum wirkt sich teilweise auch messbar auf die Fahrdaten aus: zumindest beim Vergleich der beiden kontaktlosen Interaktionsvarianten mit Zoom waren die Spurhaltewerte signifikant besser, wenn ein Element mittels Lenkradknopf selektiert wurde, als wenn dies durch eine direkte Berührung des Bildschirms geschah. Dies hat vermutlich zwei Gründe. Zum einen ist die vorliegende Aufgabe so geartet, dass sich die Suche nach einem Element und dessen Auswahl mehrmals schnell hintereinander abwechseln. Die Zeit, die durch die fehlende Bewegung des Fingers hin zum Bildschirm gespart wird, wirkt sich dann positiv auf die Bearbeitungszeiten der Aufgaben aus. Zum anderen wurde ein konkretes Problem bei der Elementauswahl durch direkte Berührung beobachtet: die vertikale Ausrichtung des Touchscreens bewirkt bei der blinden Bedienung eine leichte Trajektorie des auswählenden Fingers nach unten anstelle einer geraden Bewegung in Richtung des Bildschirms. Da es bei den entsprechenden Konzeptvarianten trotzdem nicht zu einer erhöhten Fehleranzahl kam, könnte darauf geschlossen werden, dass sich die Probanden mehr Zeit für die Auswahl nehmen mussten.

Eine eindeutige Antwort kann auch auf die Frage nach dem Potenzial der Zooming-Visualisierung gegeben werden. Sowohl die subjektiv empfundene Auslastung als auch die durchschnittlich benötigte Zeit für einen Tastendruck und die Abweichung der Spur waren signifikant höher, wenn die Konzepte die Zooming-Funktionalität implementierten als wenn dies nicht der Fall war. Der Grund für diese schlechteren Werte war vermutlich die sehr unruhige Darstellung während der Interaktion. Dadurch dass sich der Finger frei im dreidimensionalen Raum bewegte, wurde sowohl die Skalierung der Inhalte als auch der Auswahl des aktuellen Bildausschnitts ständig verändert. Die alternative Darstellung, lediglich das Element, über dem sich der Cursor gerade befindet, zu vergrößern und dafür eine Neustrukturierung der Inhalte vorzunehmen bringt hier vermutlich auch keinen entscheidenden Vorteil. Einer der wichtigsten Faktoren bei der Darstellung von Inhalten, welche halbtransparent die Fahrszene überlagern ist vermutlich die Ruhe der Anzeigen. Dies deckt sich auch mit der HUD-Forschung, in der Animationen höchstens verwendet werden, um die Aufmerksamkeit des Fahrers sehr gezielt auf einzelne Elemente zu lenken [110].

Nicht eindeutig geklärt werden kann die Frage, ob die kontaktlose oder die kontaktbasierte Suche nach dem Zielelement effektiver und verträglicher mit der Fahraufgabe ist. Hierbei konnte bei keiner gemessenen Variable ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Hierbei konnte allerdings lediglich ein Konzeptpaar miteinander verglichen werden, da sich alle übrigen Konzeptvergleiche immer in mindestens einem weiteren Faktor unterschieden. Letztlich zeigt aber die subjektive Einschätzung der Probanden, dass für die meisten Probanden die kontaktbasierte Suche nach einem Element zu bevorzugen ist. Grund hierfür ist die bessere haptische Führung des Fingers, der bei den *Hover*-Konzepten frei in der Luft schwebt. Denjenigen Probanden allerdings, die die kontaktlose Suche bevorzugten, fiel das herumrutschen mit dem Finger auf dem Display sehr schwer. Sie empfanden die berührungslose Interaktion angenehmer und weniger anstrengend.

### 5.2.5 Hauptstudie: Vergleich mit direkter Touch-Interaktion

Nachdem in der Vorstudie einige der Forschungsfragen bereits beantwortet werden konnten, wird das Konzept nun mit einer Standardbedienung eines Touch-Screens verglichen. Insbesondere die Effekte der Interaktion *vor* dem Bildschirm sowie die Spiegelung der Visualisierung in das HUD und die daraus folgende indirekte Interaktion sind hierbei von Interesse. Obwohl die meisten Probanden das Konzept *Slide and Click* gegenüber *Hover and Click* bevorzugten, wird Letzteres in der folgenden Studie nicht mehr in den Vergleich miteinbezogen. Ein wesentlich komplexeres Studiendesign und keine zu erwartenden signifikanten Unterschiede zu *Hover and Click* sind die Gründe hierfür. Stattdessen wurde ein Studiendesign mit einer Systematischen Trennung der Faktoren *Auswahlmodalität* (mit den Faktorstufen Touch und Lenkradtaste) und *Ausgabemodalität* (mit den Faktorstufen HUD und CID) gewählt (siehe Abbildung 5.18).

		Anzeigeort	
		Mittelkonsole (CID)	HUD
Interaktion - Auswahlmodalität	Touch	Hover And Touch CID	Hover And Touch HUD
		Touch (Vergleichsbedingung)	
	Lenkradknopf	Hover And Click CID	Hover And Click HUD

**Abbildung 5.18:** Die sechs Bedingungen in der Hauptstudie.

**Aufbau** Die zweite Studie fand in dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen „Usability Lab“ statt. Für die Sekundäraufgabe kam erneut der Lenovo Tablet-Computer X201 zum Einsatz, welcher rechts vom Fahrer um etwa 10° zu ihm geneigt in der Sitzkiste angebracht wurde. Etwa 45 cm darüber wurde die Microsoft Kinect installiert (siehe Abbildung 5.19).



**Abbildung 5.19:** Aufbau in der Hauptstudie. Links die Position der Kinect im Verhältnis zum Touchscreen. Rechts die Fahrerperspektive durch das HUD auf die Fahrscene.

Um die Qualität der Positionserfassung vor dem Touchscreen zu optimieren, wurde die Windschutzscheibe aus der Sitzkiste entfernt. Der rechte Arm der Probanden wurde durch eine etwa 15 cm erhöhte Armlehne unterstützt, um die ergonomische Situation bei der Interaktion zu verbessern.

**Stichprobe** An dem Versuch nahmen insgesamt 40 Probanden teil, davon 38 Männer und zwei Frauen. Das Alter der Versuchspersonen lag zwischen 21 und 55 Jahren ( $M=35,5$ ,  $SD=8,9$ ). Keiner der Probanden hatte bereits an dem Vorversuch teilgenommen. Unter den Probanden waren lediglich vier Linkshänder, von denen bis auf einen Probanden allerdings alle regelmäßig rechtshändige Touch-Interaktion im Fahrzeug nutzten. Die Bedienung eines Touchscreen-Gerätes war den meisten Probanden sehr geläufig: 90% besaßen ein solches Gerät (beispielsweise Smartphone) und gaben an es regelmäßig zu nutzen.

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Alle Probanden erlebten und bewerteten jedes System (Within-Subjects Design) und absolvierten somit insgesamt fünf Messfahrten. Nach der Begrüßung der Probanden und der Aufnahme der demographischen Daten wurden die Versuchspersonen aufgefordert in der Sitzkiste Platz zu nehmen und sich Sitz sowie Spiegel auf ihre Bedürfnisse einzustellen. In einer anschließenden, sechs Kilometer langen Probefahrt, konnten sich die Probanden an das Fahren im Simulator gewöhnen. Bei den darauffolgenden Messfahrten wurde zunächst immer das nächste Interaktionskonzept erläutert, dann bekamen die Versuchspersonen die Gelegenheit mit diesem eine Beispielingabe zu tätigen, woraufhin die Messfahrt gestartet wurde. Die Reihenfolge der Interaktionskonzepte wurde dabei permutiert, um Gewöhnungseffekte zu vermeiden.

Die Fahraufgabe während einer Messfahrt bestand darin einem Vorderfahrzeug auf der rechten Spur einer dreispurigen Autobahn mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h und einem möglichst konstanten Abstand von 50 m zu folgen. Dabei sollten die Probanden zusätzlich die Spur bestmöglich halten. Die Streckenföhrung beinhaltete sowohl leichte Auf- und Abstiege als auch leichte Kurven.

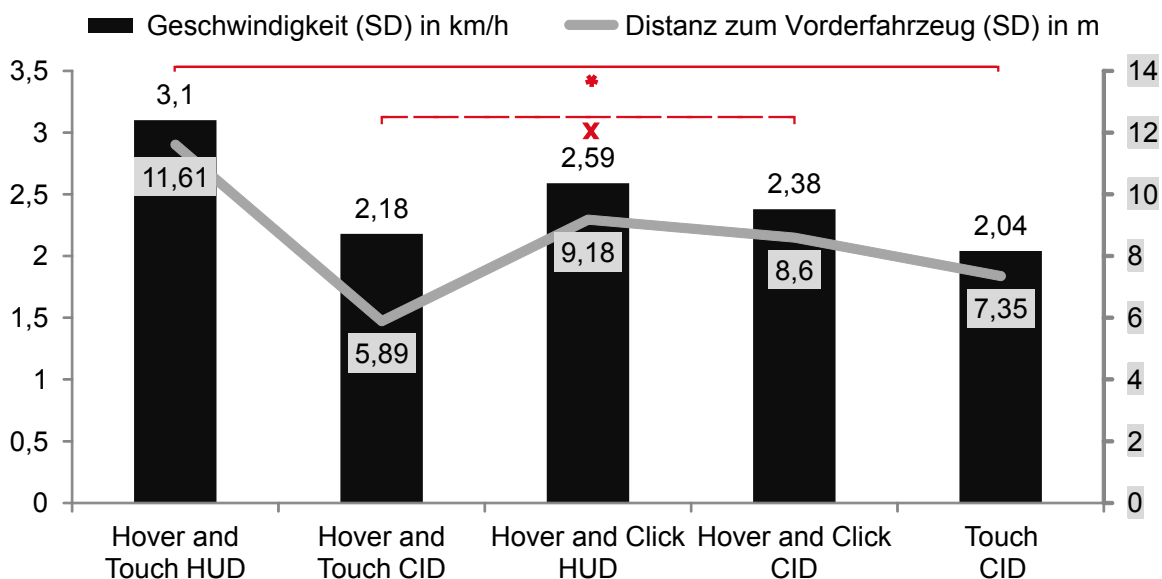
Für die Nebenaufgabe wurden analog zur Vorstudie die vier deutschen Städtenamen „Chemnitz“, „Stuttgart“, „Berlin“ und „Frankfurt“ zur Eingabe auf einer „QWERTZ“-

Tastatur ausgewählt. Für die Durchführung der Nebenaufgabe wurden feste Abschnitte (etwa alle 2 km) auf der Strecke definiert. Den Probanden wurde der Start einer Interaktionsphase durch ein akustisches Signal mitgeteilt, der Versuchsleiter instruierte sie kurz vorher, welcher Städtenamen in der darauffolgenden Interaktionsphase einzugeben sei. Die Versuchspersonen wurden instruiert sich während der Interaktionsphasen auf die Primäraufgabe, das Fahren, zu konzentrieren, die Sekundäraufgabe jedoch so schnell und gut wie möglich zu bearbeiten.

Nach jeder Fahrt, sowie nach Beendigung aller Fahrten wurde von den Probanden ein Fragebogen ausgefüllt, in dem die Systeme analog zur Vorstudie subjektiv bewertet werden konnten.

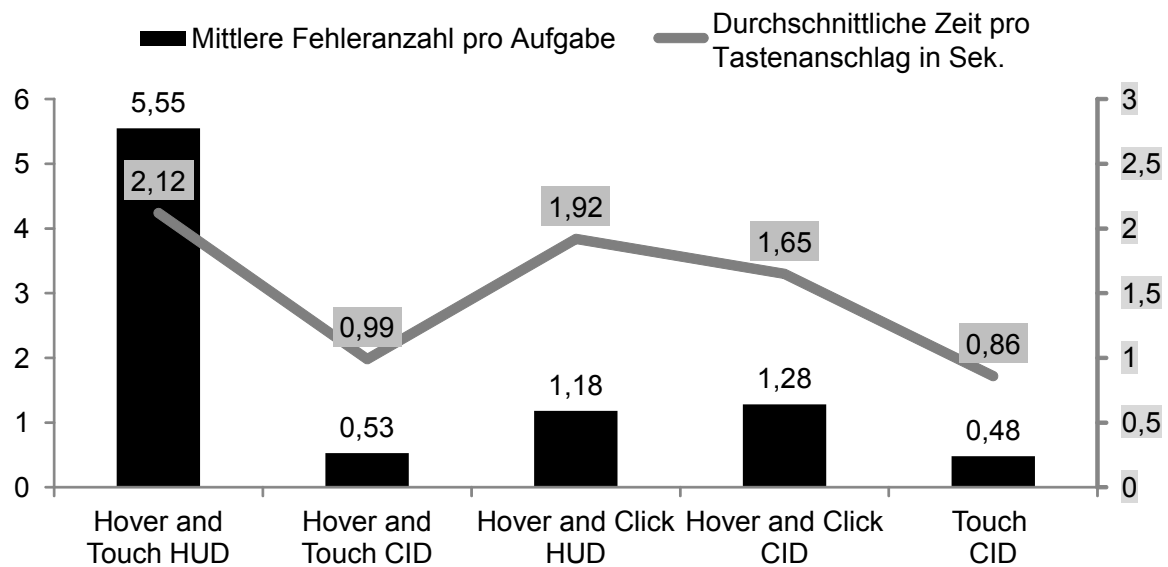
**Ergebnisse** Alle Fahrdaten wurden mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) und gegebenenfalls paarweisen t-Tests für verbundene Stichproben auf eventuell auftretende Signifikanzen untersucht.

Bezüglich der Längsführung (siehe Abbildung 5.20) wurde sowohl für die Standardabweichung der gefahrenen Geschwindigkeit ( $F(1,39)=5,25$ ,  $p<0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,12$ ) als auch für die Standardabweichung des Abstands zum Vorderfahrzeug ein **signifikanter Einfluss des Anzeigeorts** ( $F(1,39)=6,42$ ,  $p<0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,14$ ) festgestellt. Bei keiner der abhängigen Variablen konnte jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen korrespondierenden Konzepten (Unterscheidung ausschließlich bezüglich Anzeigeort) festgestellt werden.



**Abbildung 5.20:** Daten der Längsführung. Die Standardabweichung der Distanz zum Vorderfahrzeug ist als graue Linie dargestellt (rechte y-Achse), die der Geschwindigkeit als schwarze Balken (linke y-Achse). Die signifikant verschiedenen Paare sind mit einem x (Distanz) und einem \* (Geschwindigkeit) gekennzeichnet.

Ein **Haupteffekt des Anzeigeorts** wurde ebenfalls bei der Leistung in der Sekundäraufgabe ermittelt (siehe Abbildung 5.21). Dies betrifft sowohl die durchschnittlich benötigte Zeit für das Auslösen eines Elements ( $F(1,39)=176,6$ ,  $p<0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,82$ ), als auch die durchschnittliche Fehlerrate pro Aufgabe ( $F(1,39)=24,2$ ,  $p<0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,38$ ).



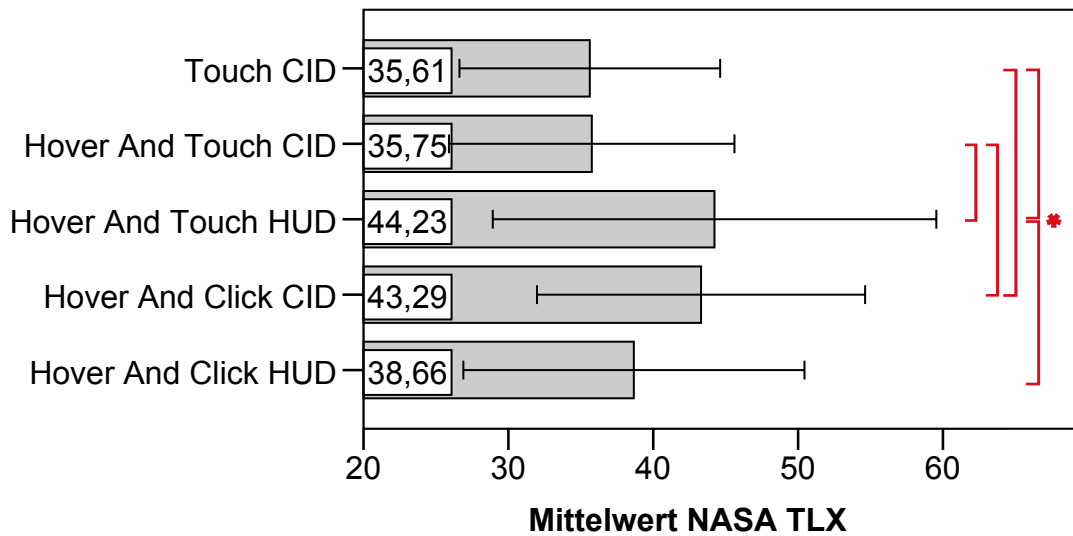
**Abbildung 5.21:** Daten der Sekundäraufgabe. Die durchschnittliche Zeit pro Tastendruck wird durch die graue Linie (rechte y-Achse), die durchschnittliche Fehleranzahl pro Aufgabe durch die schwarzen Balken (linke y-Achse) gekennzeichnet. Signifikant verschiedene Paare wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gekennzeichnet (siehe Text).

Paarweise Vergleiche mittels t-Tests ergeben, dass bezüglich der durchschnittlichen Bedienzeit pro Taste sowohl die herkömmliche Touch-Bedienung (Baseline), als auch das Konzept *Hover and Touch CID*, allen anderen Konzepten signifikant überlegen sind ( $p < 0,005$ ). Zwischen diesen beiden Konzepten besteht allerdings kein signifikanter Unterschied. Bei der Analyse des Effekts des Anzeigeorts ist hier allerdings ausschließlich der signifikante Unterschied zwischen *Hover and Touch CID* und *Hover and Touch HUD* von Interesse, da die übrigen Konzeptvergleiche sich in mehr als diesem Faktor unterscheiden.

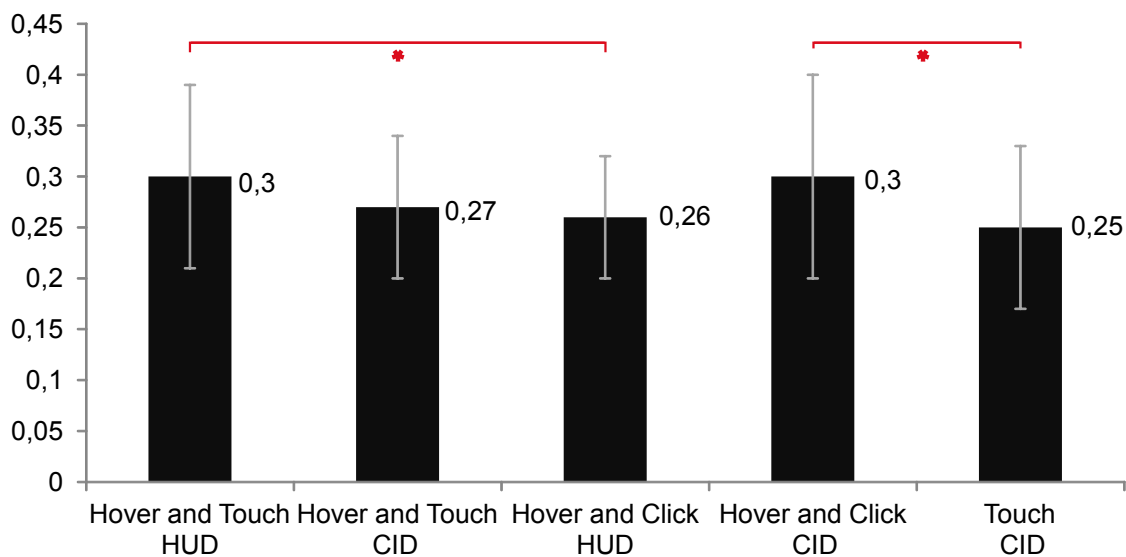
Bezüglich der durchschnittlichen Fehler pro Aufgabe wurden ebenfalls paarweise Wilcoxon-Tests durchgeführt. Hier wurde lediglich festgestellt, dass mit dem Konzept *Hover and Touch HUD* signifikant mehr Fehler gemacht wurden, als mit allen übrigen Konzepten ( $p < 0,005$ ).

Bei der Analyse der subjektiv empfundenen Auslastung (NASA RTLX) konnte mittels einer zweifaktoriellen Varianzanalyse ebenfalls ein **signifikanter Einfluss des Anzeigeorts** ermittelt werden ( $F(1, 39) = 28,7, p < 0,05$ ). Mithilfe von paarweisen t-Tests konnte insbesondere ein signifikanter Unterschied zwischen den Konzepten *Hover and Touch CID* und *Hover and Touch HUD* identifiziert werden ( $p < 0,005$ ). Der entsprechende Vergleich zwischen den Konzepten *Hover and Click CID* und *Hover and Click HUD* ist nicht signifikant. Weitere signifikant unterschiedliche Konzeptvarianten sind Abbildung 5.22 zu entnehmen.

Neben dem Haupteffekt des Anzeigeorts wurde weiterhin ein **Interaktionseffekt von Anzeigeort und Selektionsmodalität** ermittelt. Dieser betrifft die SDLP-Werte ( $F(1,39)=16,7, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,30$ ) sowie die Standardabweichung des Abstands zum Vorderfahrzeug ( $F(1,39)=6,42, p < 0,05, \eta_p^2 = 0,14$ ). Im Falle der SDLP-Werte (siehe Abbil-



**Abbildung 5.22:** Subjektive Auslastung (NASA RTLX) für die einzelnen Bedingungen. Die signifikant verschiedenen Paare sind mit einem \* gekennzeichnet.



**Abbildung 5.23:** Daten der Querführung. Die signifikant verschiedenen Paare sind mit einem \* gekennzeichnet.

dung 5.23) wurde durch paarweise durchgeführte t-Tests eine signifikant niedrigere Spurabweichung für das Konzept *Hover and Touch HUD* im Vergleich mit *Hover and Click HUD* ( $p < 0,005$ ) ermittelt. Im Falle der Standardabweichung des Abstands zum Vorderfahrzeug wurde festgestellt, dass die Benutzung von *Hover and Touch CID* zu einer besseren Abstandshaltung geführt hat, als die Verwendung von *Hover and Click CID* ( $p < 0,005$ ).

Auch wenn jeweils nur einer der relevanten Vergleiche signifikant ist: bei beiden abhängigen Variablen kann beobachtet werden, dass die Selektion via Lenkradtaste mit der HUD-Anzeige kombiniert zu besseren Werten führt, sich die Selektion via Touch allerdings in Kombination mit dem CID vorteilhaft auswirkt (siehe Abbildungen 5.23, sowie 5.20).

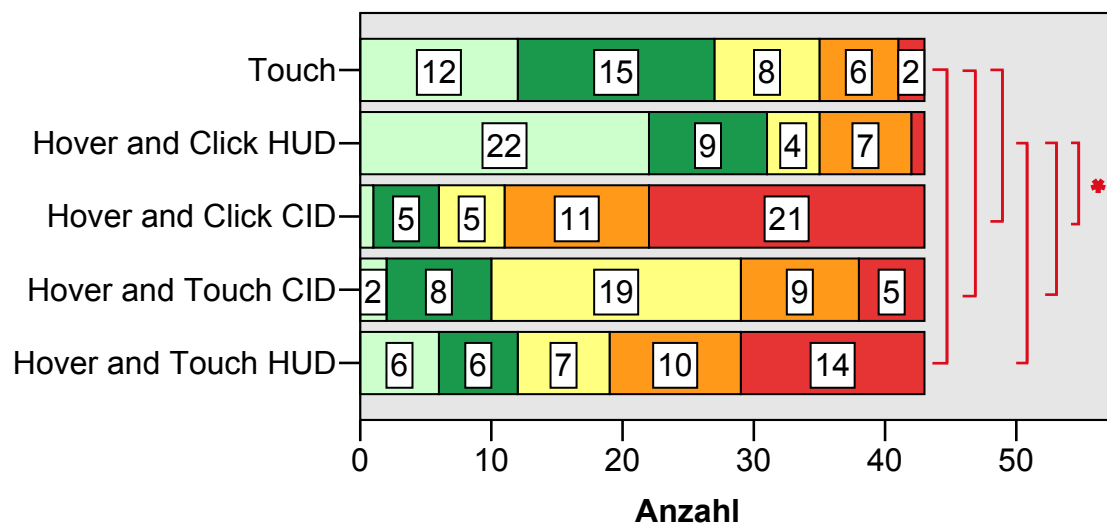


Dieser Interaktionseffekt kann auch bei den Leistungen in der Sekundäraufgabe beobachtet werden, sowohl bezüglich der durchschnittlich benötigten Zeit pro Tastenanschlag ( $F(1,39)=51,0$ ,  $p<0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,57$ ) als auch bei der durchschnittlichen Anzahl der Fehler ( $F(1,39)=26,6$ ,  $p<0,05$ ,  $\eta_p^2 = 0,40$ ). Paarweise durchgeführte t-Tests konnten hier signifikant kürzere Anschlagszeiten für *Hover and Touch CID* im Vergleich zu *Hover and Click CID*, sowie eine signifikant niedrigere Fehlerrate für *Hover and Click HUD* als mit *Hover and Touch HUD* identifizieren.

Interessant ist auch die Interpretation der Daten bezüglich der Nützlichkeit des 3D-Cursors ohne HUD-Visualisierung. Hier kann festgestellt werden, dass die zusätzliche Information über die Distanz zwischen Finger und Bildschirm in keinem Fall eine Auswirkung auf die gemessenen Parameter hatte.

Außerdem kann festgestellt werden, dass die komplett berührungslose Interaktion (kontaktlose Suche und Auswahl über den Lenkradknopf) durchweg negative Effekte hatte, wenn die Anzeige nicht auf dem HUD dargestellt wurde. Das Konzept *Hover and Click CID* schnitt bei den SDLP-Werten, der durchschnittlichen Fehleranzahl und Geschwindigkeit für den Sekundärtask, sowie den NASA-RTLX Werten jeweils signifikant schlechter ab, als herkömmliche Touch-Bedienung ( $p<0,005$ ).

Auch das berührungslose Konzept *Hover and Click HUD* erzeugte etwas mehr subjektiv empfundene Auslastung und führte zu etwas schlechterer Leistung in der Sekundäraufgabe. Im Erprobungsszenario konnten allerdings keinerlei negative Auswirkungen auf die Fahrleistung gemessen werden. Auch die subjektive Meinung der Probanden war sehr positiv: Wie in Abbildung 5.24 zu sehen ist, wurde dieses Konzept im Vergleich zu herkömmlicher Touch-Bedienung fast doppelt so oft auf den ersten Platz gewählt. Außerdem erreicht das System *Hover and Click HUD* bezüglich der subjektiv empfundenen Ablenkung auf einer fünfstufigen Likertskala von allen Konzepten die beste Wertung (Med=3) gefolgt von traditioneller Touch- Interaktion (Med=3,5). Dabei konnten die Probanden besonders von der geringeren Blickabwendung (Med=2) im Vergleich zu herkömmlicher Touch-Interaktion (Med=5) profitieren.



**Abbildung 5.24:** Einordnung der Systeme in eine Rangordnung. Die signifikant verschiedenen Paare sind mit einem \* gekennzeichnet.

**Diskussion** In der zweiten Studie wurden in einem veränderten Versuchsdesign ausgewählte Konzeptvarianten mit herkömmlicher Touch-Interaktion verglichen. Außerdem wurden die Daten auf isolierte Effekte der Interaktionsmodalität und des Anzeigeortes untersucht. Dabei wurde zwar ein Einfluss des Anzeigeorts festgestellt, der sich jedoch nicht systematisch auf die einzelnen Konzeptvergleiche auswirkte. Ein Interaktionseffekt zwischen Anzeigeort und Interaktionsmodalität konnte dabei wesentlich deutlicher nachvollzogen werden. Die Kombination aus HUD-Anzeige und Auswahl durch einen Lenkradknopf funktionierte sehr gut, wohingegen die Auswahl durch Touch bei gleichem Ausgabeort eher negative Effekte auf die Daten hatte. Andersherum wirkte sich die Kombination aus CID-Anzeige und Auswahl durch einen Lenkradknopf eher schlecht aus, während sich die Anzeige auf dem CID sehr gut mit Touch-Interaktion kombinieren ließ. Dabei waren die Effekte der Auswahl durch den Lenkradknopf dabei mit sehr großer Wahrscheinlichkeit auf die implizierte kontaktlose Suche zurückzuführen. Eine kontaktlose Suche mit anschließender Berührung des Displays wirkte sich nämlich - wie bereits in der Vorstudie gezeigt wurde - negativ auf die Daten aus, wenn die Anzeige im HUD erfolgte. Bei der herkömmlichen Touch-Interaktion mit dem CID hingegen ist die direkte Hand-Augen-Koordination für das „Treffen“ des gewünschten Elements verantwortlich. Dies erfordert zwar viel visuelle Aufmerksamkeit, eine zusätzliche Auswahlmodalität beziehungsweise die kontaktlose Suche vor dem Bildschirm ist hierbei jedoch offensichtlich kontraproduktiv.

Von den Konzepten, die in der zweiten Studie verglichen wurden, war die Variante *Hover and Click HUD* am vielversprechendsten. Hier traten gegenüber der Vergleichsbedingung „herkömmliche Touch-Interaktion“ keine nachteiligen Effekte bezüglich der Fahrleistung auf, dafür war die Interaktion generell etwas langsamer und fehleranfälliger. Im Gegenzug gaben die Probanden an, weniger abgelenkt zu sein sowie subjektive Verbesserungen im Blickverhalten zu erfahren. Daher bevorzugten sie letztlich das Konzept *Hover and Click HUD* gegenüber herkömmlicher Touch-Bedienung. Dennoch spiegelte sich erwartungsgemäß die Komplexität des Anwendungsfalls „alphanumerische Texteingabe“ in den Daten wieder. Das Verlagern der Interaktion in das primäre Sichtfeld des Fahrers kann sich zwar durchaus vorteilhaft auf das Blickverhalten auswirken, jedoch darf die Komplexität der Interaktion dabei nicht zu groß werden. Dies wurde auch bereits in der HUD-Forschung gezeigt [110].

Systeme, die eine indirekte Interaktion mit einer kontaktbasierten Auswahl unterstützen (*Slide*), wurden in dieser Studie nicht mehr berücksichtigt. Letztlich könnte aber das System *Hover and Click* von einem Nutzer genauso bedient werden wie *Slide and Click*. Existierte ein entsprechendes System zur Positionserfassung der Hand vor dem CID, wäre es dem Nutzer überlassen, wie weit vor dem CID die Auswahl tatsächlich getätigt wird.

## 5.2.6 Diskussion

In diesen Studien konnten lediglich erste Potenziale und Herausforderungen eines indirekten Touch-Interaktionskonzepts identifiziert werden. Um ein solches System tatsächlich auch in der Realität zu nutzen, müssten weitere Studien durchgeführt werden. Insbesondere müsste gezeigt werden, dass das (vermutlich) bessere Blickverhalten während der Interaktion auch tatsächlich zu einer besseren Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens im

peripheren Sichtfeld führt. Nur dann wäre der objektive Beleg für den Nutzen eines solchen Systems auch erbracht.

Eine weitere Einschränkung, die im Rahmen dieser Studie nicht untersucht werden konnte, sind die Vibrationen und Beschleunigungskräfte, die bei einer realen Fahrt im Fahrzeug auftreten. Diese würden vermutlich zunächst zumindest die kontaktlose Suche nach dem auszuwählenden Element beeinträchtigen. Die in der zweiten Studie zum Einsatz kommende Armlehne konnte die ergonomischen Bedingungen beim Zeigen auf Inhalte im CID bereits deutlich verbessern. Letztlich könnte sie jedoch auch dafür sorgen unerwünschte Vibrationen des zeigenden Armes zu minimieren. Außerdem würde der Einsatz prädiktiver Filter-Algorithmen (Kálmán) hier vermutlich zusätzlich entgegenwirken.

Ob das System letztlich in der Datenbrille oder im HUD zum Einsatz kommen würde, wäre wohl nicht entscheidend; dennoch müssten abschließende Untersuchungen natürlich auf ihrer jeweiligen Zielplattform durchgeführt werden.

Durch die duplizierte Anzeige eines Touchscreens im primären Sichtfeld des Fahrers kann möglicherweise die sonst sehr hohe visuelle Ablenkung von Touchscreen-Interaktion reduziert werden. Allerdings zeigte sich, dass die Darstellung von animierten Inhalten hier eher vermieden oder ausschließlich zur gezielten Aufmerksamkeitslenkung genutzt werden sollte. Sowohl Gesten auf dem Touchscreen selbst, als auch präemptive Zeigegesten haben grundsätzlich das Potenzial eine indirekte Bedienung des Touchscreens zu ermöglichen. Insbesondere die Verwendung eines Lenkradknopfes zur expliziten Selektion hatte überwiegend positive Effekte auf die gemessenen Daten. Durch die Verwendung der Handerkennung zur automatischen Ableitung eines Interaktionswunsches können die Anzeigen nutzungsbezogen ein- und ausgeblendet werden. Dadurch können sowohl unerwünschte Verdeckungen als auch Ablenkung reduziert werden.

## 5.3 Zeigegesten und ein physikalischer Controller in der Mittelkonsole

Kapitel 5.3 basiert auf der Publikation: F. Lauber, C. Böttcher und A. Butz. You've Got the Look: Visualizing Infotainment Shortcuts in Head-Mounted Displays. Erschienen in *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI)*, Seiten 1–8. ACM, 2014. [84]. Der Publikation liegt die Masterarbeit „Entwicklung und Evaluation eines Menüinteraktionskonzepts für Head-Mounted Displays im Fahrzeug“ von Claudius Böttcher zugrunde. Themenstellung sowie die Betreuung der Arbeit wurden von Felix Lauber geleistet. Maßgebliche Teile des entwickelten Konzepts, die Programmierung des Prototypen, Durchführung und Auswertung der Studie stammen von Claudius Böttcher.

Ziel dieses Kapitels ist zunächst die Beschreibung eines Anzeige- und Interaktionskonzept, welches speziell für die Nutzung einer Datenbrille entwickelt wurde. Anhand dieses

Konzepts wird anschließend untersucht, welche Auswirkungen die verschiedenen Stabilisierungsformen *kopfstabil* und *fahrzeugstabil* auf die Leistungen in Primär und Sekundäraufgabe haben. Die Erkennung der Hand in einem fest definierten Interaktionsbereich als Indikator für ein Interaktionsvorhaben des Nutzers wurde in Kapitel 5.2 bereits erfolgreich für Gesteninteraktion angewandt. In diesem Kapitel wird dieses Konzept nun auf die Benutzung eines physikalischen Controllers (Dreh-Drücksteller) übertragen. Alternativ zur Bedienung mit einem Dreh-Drücksteller wird abermals die Bedienung mittels Handgesten erprobt. Durch einer erhebliche Reduzierung deren Komplexität soll eine einfache, effektive und ablenkungsarme Bedienung ermöglicht werden.

Nachdem im vorhergehenden Kapitel für die Darstellung der Interaktionskonzepte ausschließlich ein technisch perfektes HUD als Ausgabemedium genutzt wurde, so wird nun primär eine Datenbrille verwendet. Die Ausgabe im HUD wird trotzdem weiterhin als Vergleichsbedingung erhalten, um die negativen Effekte des Kopftrackings und der Qualität der Datenbrille bei fahrzeugstabilen Anzeigen identifizieren zu können.

### 5.3.1 Konzept

**Vorüberlegungen** Zu den theoretischen Vorteilen der Datenbrille gehört die Möglichkeit Inhalte direkt im Blickfeld des Nutzers anzeigen zu können. Dadurch wird dem Fahrer eine Kopfdrehung in Richtung eines Innenraumdisplays erspart und - so wenigstens die theoretischen Überlegungen (siehe Kapitel 2.2) - die Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens bleibt auch während der Interaktion mit den Anzeigen bis zu einem gewissen Grade erhalten. Allerdings, so zeigen die Studien aus Kapitel 4, drohen hierbei neben einer erhöhten visuellen Belastung des Fahrers (im Vergleich zu einem freien Blickfeld) auch unerwünschte Verdeckungseffekte. Das folgende Konzept beruht daher auf der Überlegung die interaktiven Inhalte ausschließlich dann anzuzeigen, wenn der Fahrer auch den Wunsch hat mit ihnen zu interagieren. Wie im Kapitel 5.2 wird dieser Wunsch von der Anwesenheit der Hand in einem Interaktionsbereich abgeleitet. Wird die Hand aus diesem Interaktionsbereich entfernt, so wird von einer abgeschlossenen oder unterbrochenen Interaktionssequenz ausgegangen und die Anzeige in der Datenbrille auch wieder deaktiviert. Sollte sich der Fahrer innerhalb einer nicht abgeschlossenen Interaktionssequenz befinden und plötzlich in eine Verkehrssituation gelangen, die seine ungeteilte Aufmerksamkeit benötigt, so wird durch das Zurückführen der Hand zum Lenkrad die Anzeige in der Datenbrille zurückgesetzt und alle sensorischen und mentalen Ressourcen können für die Durchführung der Fahraufgabe eingesetzt werden. In Kombination mit indirekten Bedienmodalitäten wie einem Dreh-Drücksteller und einfachen Handgesten sollen so die Vorteile einer Datenbrille maximal genutzt werden.

Eine weitere für die Entwicklung dieses Konzepts entscheidende Überlegung ist, dass die Anzeigen in der Datenbrille traditionelle Anzeigen im Fahrzeug nicht ersetzen, sondern komplementär dazu verwendet werden. Daher wird nicht die gesamte Funktionalität moderner Infotainment-Systeme auf die Datenbrille portiert. Stattdessen soll eine Teilmenge der Funktionen, die häufig während der Fahrt genutzt werden, für einen möglichst schnellen und komfortablen Zugriff optimiert werden. Die Anzahl der Interaktionsschritte wird dabei auf ein Minimum reduziert und die visuelle Wahrnehmung durch akustische Unterstützung entlastet.

**Interaktionsmodalitäten** Die erste Bedienmodalität, die für die Anzeigen eingesetzt wurde, ist der Dreh-Drücksteller. Ein Drehen des Bedienelements wurde dabei in eine horizontale Verschiebung des (Vor-)Auswahlbereichs im Menü übersetzt. Ein vorausgewähltes Element wird durch Drücken des Bedienelements selektiert. Das Kippen des Bedienelements wurde nicht angebunden und blieb somit ohne Funktion. Ein neben dem Dreh-Drücksteller positionierter Leap-Motion-Controller (siehe Abbildung 5.25) wurde für die An- und Abwesenheitserkennung der Hand im Interaktionsbereich verwendet.

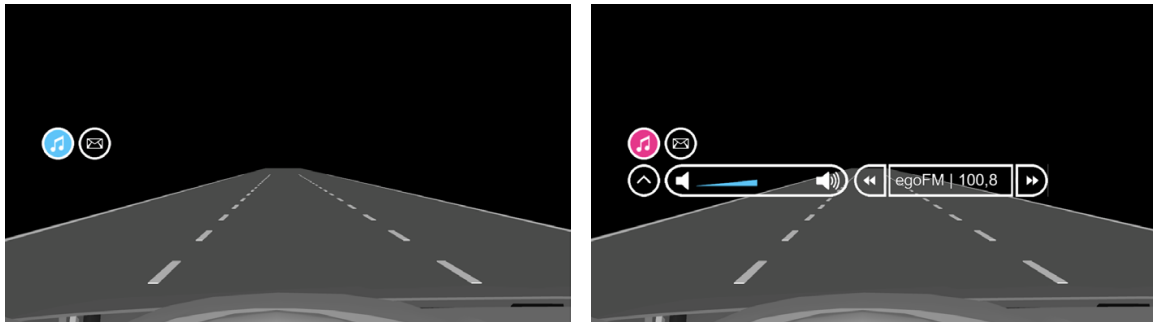
Alternativ zu dem Dreh-Drücksteller kann die Anzeige auch mittels Handgesten bedient werden. Dabei wird der zeigende Arm durch eine erhöhte Armlehne unterstützt, um einer schnellen Ermüdung vorzubeugen. Um das Prinzip der Bedienung mittels Zeigegestik zu vereinfachen, wird nur ein Freiheitsgrad für die Armbewegung für die Interaktion mit den Anzeigen verwendet. Dabei werden horizontale Armbewegungen analog zur Drehbewegung des Dreh-Drückstellers behandelt und bewegen beispielsweise den Auswahlbereich im Menü. Auf- beziehungsweise Abwärtsbewegungen der Hand, sowie Bewegungen in Richtung der Mittelkonsole oder davon weg, bleiben hingegen ohne Folgen für die Anzeigen in der Datenbrille. Bei der Manipulation der Anzeigen wird dabei die Handposition direkt in die Position des Auswahlbereichs übersetzt. Eine Verschiebung des Auswahlbereichs um beispielsweise zwei Positionen nach rechts erfolgt somit durch eine Handbewegung nach Rechts mit der doppelten Distanz im Vergleich zu einer Verschiebung des Auswahlbereichs um eine Position. Die Alternative, die Verwendung einer repetitiven Armgeste nach rechts (zwei Wiederholungen für eine Verschiebung um zwei Positionen) wurde für die Interaktion mit einer Menüstruktur nicht in Betracht gezogen, da sie als zu ermüdend eingeschätzt wurde. Bei der Bedienung des Systems durch Gesten wird ein vorausgewähltes Element durch einen Druck auf einen Knopf auf der linken Seite des Lenkrads selektiert.



**Abbildung 5.25:** Mittelkonsole mit erhöhter Armstütze, Dreh-Drücksteller und daneben positioniertem Leap-Motion Controller.

**Menüstruktur und Anwendungsfälle** Die Anzeigen auf der Datenbrille basieren auf einer hierarchischen Menüstruktur mit zwei Ebenen. Die erste Ebene besteht dabei abhängig vom Zustand des Systems (z.B. Vorliegen neuer Nachrichten) aus einem bis drei Elementen. Wird die Anzeige auf der Datenbrille aufgerufen, so wird zunächst die Anzeige des *Audio-Players* sichtbar (siehe Abbildung 5.26).

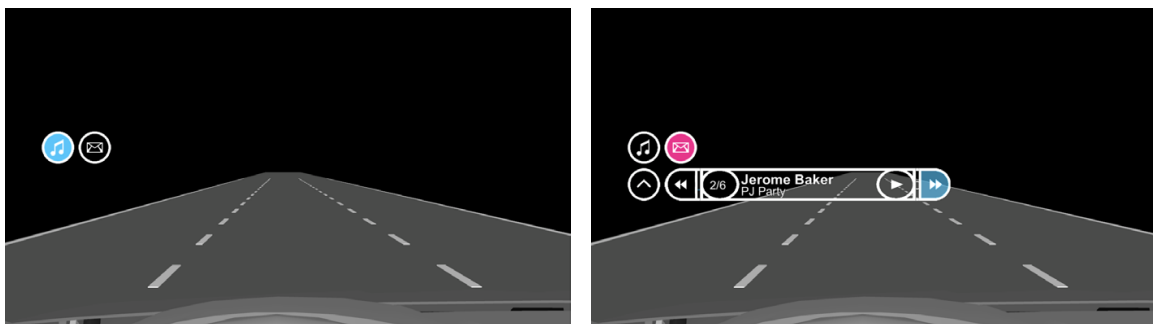
Wird dieser aktiviert, so öffnet sich ein Untermenü mit drei selektierbaren Elementen. Auf der linken Seite befindet sich ein Element, mit dem das Untermenü wieder geschlossen werden kann (Pfeil nach oben). In der Mitte des Untermenüs befindet sich ein analoger



**Abbildung 5.26:** Wechsel der Audio-Quelle und Lautstärkeregelung

Lautstärke-Regler, der - einmal selektiert - durch Drehen des Dreh-Drückstellers beziehungsweise durch horizontale Bewegungen der Hand manipuliert werden kann. Um eine Position als neues Lautstärkeniveau festzulegen, muss eine erneute Auswahl erfolgen. Auf der rechten Seite befindet sich ein Feld auf dem der aktuelle Radiosender angezeigt wird sowie zwei auswählbare Bereiche zum Vor- beziehungsweise Zurückblättern durch die verfügbaren Radiostationen.

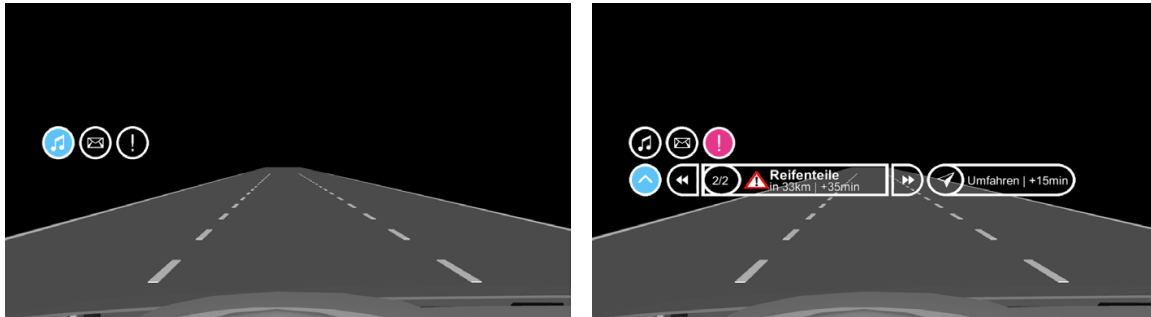
Im zweiten Anwendungsfall kann der Fahrer *Persönliche Nachrichten*, die über eine entsprechende Kommunikationsschnittstelle empfangen wurden, abrufen (siehe Abbildung 5.27). Neben dem Element am linken, äußeren Rand des Menüs, mit dem abermals das Untermenü geschlossen werden kann, finden sich hier analog zum vorherigen Anwendungsfall zwei auswählbare Elemente mit denen durch die verfügbaren Nachrichten geblättert werden kann. Zwischen diesen befindet sich ein Feld, in dem der Absender sowie der Betreff der Nachricht angezeigt wird. Hier ist außerdem ein Abspiel-Knopf abgebildet, nach dessen Selektion dem Fahrer die gerade aktive Nachricht vom System „vorgelesen“ wird.



**Abbildung 5.27:** Zugriff auf persönliche Nachrichten.

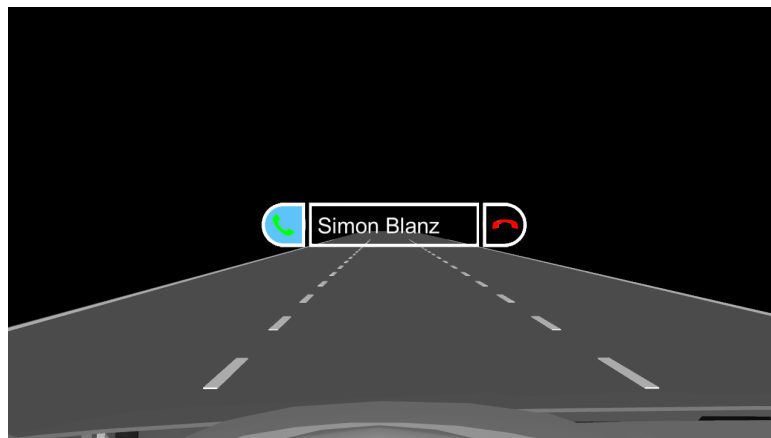
Neben den beiden ständig vorhandenen Funktionen, erscheint bei Bedarf auch ein drittes Symbol auf oberster Menüebene. Liegen dem System aktuelle *Verkehrsmeldungen* vor, die die aktuelle Route des Fahrers betreffen, so kann der Fahrer sie unter diesem Menüeintrag einsehen und bei Bedarf darauf reagieren (siehe Abbildung 5.28). Neben den bereits bekannten Schaltelementen zum Schließen des Untermenüs (linke Seite) sowie zum Blättern durch die verfügbaren Verkehrsmeldungen, existiert hier am rechten, äußeren Rand ein weiteres auswählbares Element, in dem eine Routenänderung vorgeschlagen wird. Durch die zusätzliche Angabe über die vermutliche Reisezeitverlängerung kann der Fahrer nun abwägen, ob er die Routenänderung übernehmen oder auf der aktuellen Route bleiben möchte.

Im ersteren Fall muss das entsprechende Feld ausgewählt und bestätigt werden, im letzteren Fall ist keine Aktion erforderlich.



**Abbildung 5.28:** Information über Verkehrsbeeinträchtigungen und gegebenenfalls Änderungsmöglichkeit der Route.

Mit der vierten Funktion, welche kein Symbol im Menü benötigt, hat der Fahrer die Möglichkeit auf *eingehende Anrufe* zu reagieren (siehe Abbildung 5.29). Auswählbar sind lediglich zwei Symbole, eines zum Ablehnen (rechte Seite) und eines zum Annehmen des Anrufs (linke Seite). Dazwischen wird der Name des Anrufers angezeigt.



**Abbildung 5.29:** Annehmen oder Ablehnen eines eingehenden Anrufs.

### 5.3.2 Evaluation

**Aufbau** Die Studie wurde in dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen statischen Simulator mit der E60 Sitzkiste durchgeführt. Als Datenbrille kam die in Kapitel 3.3.3 beschriebene LUMUS DK-32 zum Einsatz, für die fahrzeugstabilen Anzeigen in Kombination mit dem in Kapitel 3.3.4 beschriebenen ART Smarttrack System. Für die Vergleichsbedingung „fahrzeugstabile Anzeige im HUD“ wurde der in Kapitel 3.3.2 beschriebene HUD-Aufbau verwendet. Dieser wurde allerdings durch eine Spezielle Rahmenkonstruktion so modifiziert, dass die Anzeigeninhalte oberhalb der vorausfahrenden Fahrzeuge positioniert sind. Dadurch wurden Unterschiede bezüglich der Positionierung von Inhalten zwischen Datenbrille und HUD sowohl für kopfstabile als auch fahrzeugstabile Inhalte vermieden.

Zur Interaktion mit dem Dreh-Drücksteller kam ein BMW iDrive Controller zum Einsatz. Für die Erkennung der Handposition darüber wurde ein Leap-Motion Controller verwendet.

**Stichprobe** An der Studie nahmen 37 Personen teil, davon waren 28 männlich und neun weiblich. Das Alter der Probanden lag zwischen 19 und 56 Jahren ( $M=33,86$ ,  $SD=9,86$ ). Die Versuchspersonen waren mehrheitlich Rechtshänder ( $N=32$ ) und übten überwiegend einen technischen Beruf aus ( $N=32$ ).

**Studien-Design, Aufgabe und Vorgehen** Die Studie wurde in einem gemischten  $2 \times 3$ -Design durchgeführt. Zwei verschiedene Eingabemodalitäten, der Dreh-Drücksteller und die Handgesten, sowie drei verschiedene Ausgabemodalitäten, kopf- beziehungsweise fahrzeugstabile Anzeigen in der Datenbrille und fahrzeugstabile Anzeigen im HUD, bildeten dabei die möglichen Belegungen für die unabhängigen Variablen. Dabei erlebten alle Probanden jede Ausgabemodalität (Intrasubjekt-Variable), mit den beiden Eingabemodalitäten wurden allerdings nur jeweils die Hälfte der Versuchspersonen konfrontiert (Intersubjekt-Variable).

Nach der Begrüßung und dem Erfassen der demographischen Daten wurden die Probanden gebeten in der Sitzkiste Platz zu nehmen und Sitz- sowie Spiegelposition anzupassen. Zunächst wurde dann allen Probanden im Rahmen einer etwa fünfminütigen Eingewöhnungsfahrt die Möglichkeit gegeben, sich an das Fahren im Simulator zu gewöhnen. Die Fahraufgabe für die Eingewöhnungsfahrt sowie die anschließenden drei Messfahrten bestand darin einem Vorderfahrzeug mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h und einem möglichst konstanten Abstand von 50 m zu folgen.

In jeder der drei Messfahrten wurden vier feste Abschnitte (nach 2,1, 4,0, 6,0 und 8,0 km) festgelegt, die für die Bearbeitung der Nebenaufgabe vorgesehen waren. Jeder Abschnitt hatte exakt die gleiche Länge und wurde in etwa 72 Sekunden durchfahren. Jeweils kurz vor dem Befahren eines Abschnitts wurde dem Probanden vom Versuchsleiter die nächste zu bearbeitende Nebenaufgabe mitgeteilt. Insgesamt vier Aufgaben wurden für die Bearbeitung während der Fahrt definiert.

1. *Audio-Player*: Bei diesem Anwendungsfall sollte die Lautstärke von initial 15% auf etwa 50% angehoben werden und ein bestimmter Radiosender eingestellt werden. Die Aufgabe war korrekt beendet, wenn die richtige Radiostation ausgewählt war. Befand sich die Lautstärke zu diesem Zeitpunkt nicht zwischen 20% und 80%, wurde ein Fehler protokolliert.
2. *Persönliche Nachrichten*: Hier wurde die Aufgabe gestellt nach einer bestimmten Nachricht (Absender wurde genannt) zu suchen und diese abzuspielen. Sobald der Abspielknopf gedrückt wurde, war die Aufgabe beendet. Handelte es sich bei der abgespielten Nachricht nicht um die gesuchte, so wurde ein Fehler protokolliert.
3. *Verkehrsmeldungen*: Die Aufgabe bestand bei diesem Anwendungsfall darin korrekt auf die Verkehrsmeldungen zu reagieren. Dabei wurden insgesamt zwei Verkehrsmeldungen angezeigt. Die Probanden wurden aufgefordert lediglich die Routenänderung zu übernehmen, die ihnen einen zeitlichen Vorteil im Vergleich zur aktuellen Route gewähren würde. Die Aufgabe war beendet sobald eine Routenänderung akzeptiert wurde. Wurde die falsche Routenänderung bestätigt, wurde ein Fehler protokolliert.



4. *Eingehende Anrufe*: Die Probanden wurden instruiert einen eingehenden Anruf abzuweisen. Die Aufgabe war beendet, sobald eine der beiden Schaltflächen selektiert wurde. Wurde die falsche Schaltfläche selektiert, wurde ein Fehler protokolliert.

Zusätzlich zu den hier beschriebenen aufgabenspezifischen Fehlern, wurde jeweils ein Fehler addiert, wenn ein Untermenü oder eine Funktion selektiert wurde, die für die Lösung der aktuellen Aufgabe nicht notwendig war. Als zusätzlicher Fehler wurde gezählt, wenn die Aufgabe nicht innerhalb des vorgesehenen Streckenabschnitts beendet werden konnte.

Nach jeder Fahrt wurden die Probanden aufgefordert einen kurzen Fragebogen auszufüllen, in dem sie neben ihrer subjektiven Arbeitsbelastung (NASA RTLX) und der allgemeinen Usability (SUS) die Systeme mittels fünfstufiger Likert-Skalen bezüglich subjektiv empfundener Ablenkung und eventuell auftretender Verdeckungs- beziehungsweise Lesbarkeitsprobleme bewerten konnten.

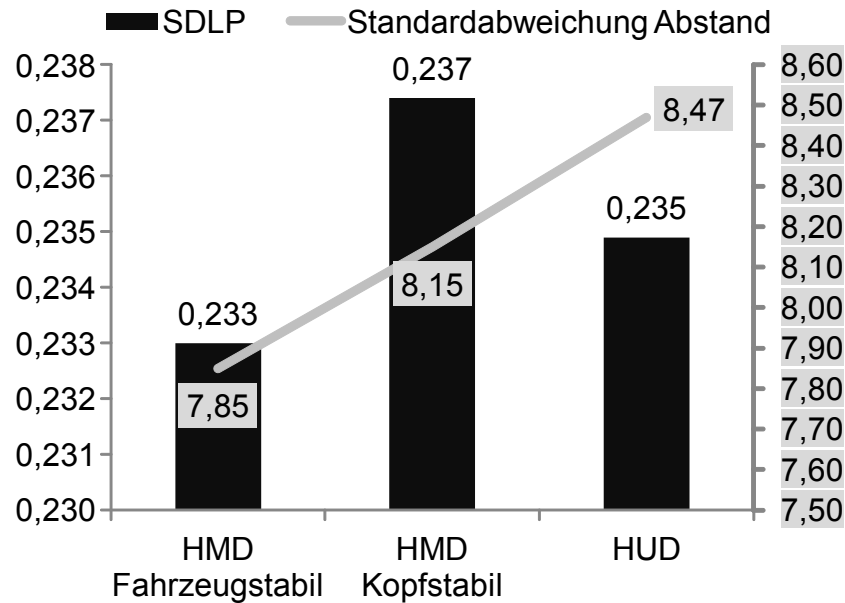
**Ergebnisse** Die folgende Analyse der Fahrdaten (Leistung in der Primäraufgabe) basiert auf 32 gültigen Probandendatensätzen. Zwei Datensätze mussten aufgrund technischer Probleme während der Versuchsdurchführung von der Auswertung ausgeschlossen werden, weitere drei Datensätze wurden als Ausreißer nicht in die statistische Auswertung mit aufgenommen (doppelte Standardabweichung über dem Mittelwert).

Bezüglich der Sekundäraufgabe wurden die Datensätze von vier Probanden (zwei wegen technischer Probleme während der Versuchsdurchführung, weitere zwei wurden als Ausreißer behandelt) von der Auswertung ausgeschlossen. Somit basieren die folgenden Berechnungen auf insgesamt 33 Probandendatensätzen. Außerdem musste die Aufgabe „Bedienung des Audio-Players“ von der Auswertung ausgeschlossen werden, da aufgrund eines Missverständnisses bei den Instruktionen in insgesamt 55 Fällen eine unterschiedliche Interaktionssequenz gewählt wurde, wodurch keine Vergleiche zwischen den Daten möglich sind.

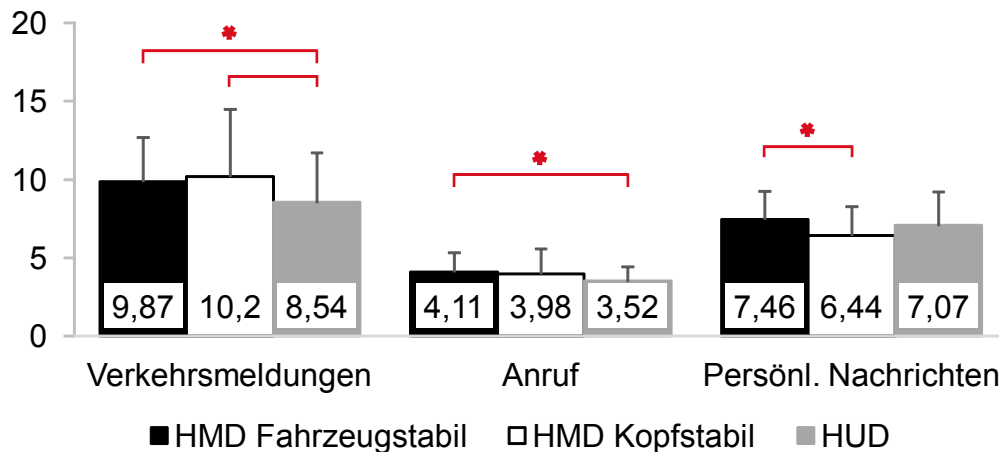
Die Leistungen in der Primäraufgabe werden im Folgenden durch die Standardabweichung des Abstands zum Vorderfahrzeug sowie durch die SDLP-Werte beschrieben. Bezüglich der Sekundäraufgabe sind protokollierten Fehler sowie die Bearbeitungsgeschwindigkeit der jeweiligen Aufgabe ausschlaggebend für den Vergleich zwischen den Bedingungen. Der Einfluss der beiden unabhängigen Variablen *Stabilisierungstechnik* und *Interaktionsmodalität* auf diese Daten wird durch Varianzanalysen (Mixed ANOVA) und nachfolgende t-Tests überprüft.

Auf die Fahrdaten (siehe Abbildung 5.30) wurde kein signifikanter Einfluss der **Stabilisierungstechnik** festgestellt. Sowohl bei der längs- als auch bei der Querführung des Fahrzeugs liegen lediglich minimale Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Anzeigeformen vor. In beiden Fällen wurden die geringsten Werte gemessen, wenn die Fahrt mit der fahrzeugstabilen Datenbrillen-Anzeige absolviert wurde.

Da die Sekundäraufgaben aufgrund ihrer unterschiedlichen Struktur und Länge nicht untereinander vergleichbar sind, wurden die einzelnen Aufgaben unabhängig voneinander verglichen. Dabei wurde zunächst festgestellt, dass die Bearbeitungsgeschwindigkeit der Aufgaben (siehe Abbildung 5.31) tendenziell länger ist, wenn die Aufgaben im der Datenbrille angezeigt und bearbeitet wurden.



**Abbildung 5.30:** Werte für SDLP und Standardabweichung des Abstands zum Vorderfahrzeug für die verschiedenen Stabilisierungstechniken.



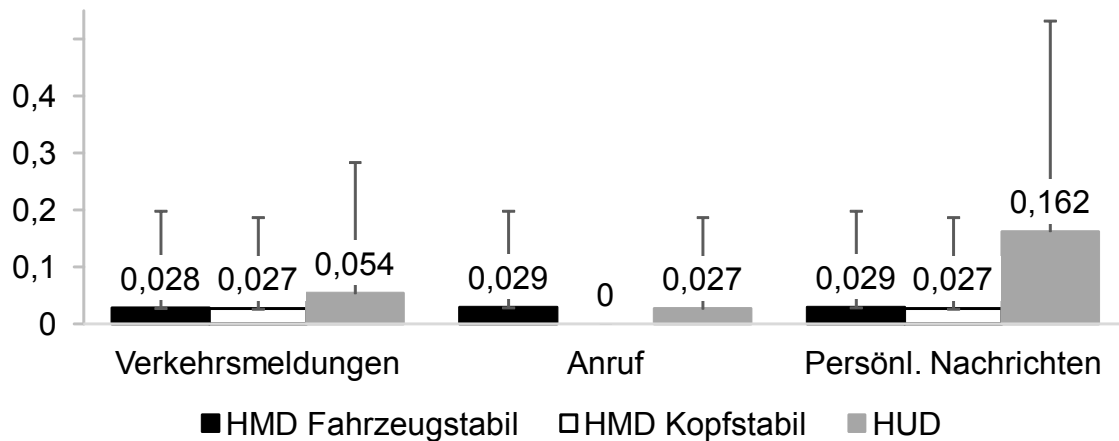
**Abbildung 5.31:** Bearbeitungsgeschwindigkeit der Aufgaben bei den verschiedenen Stabilisierungstechniken. Signifikant unterschiedliche Paare sind mit einem (\*) gekennzeichnet.

Signifikante Unterschiede wurden hier bei der Anruf-Aufgabe zwischen dem HUD und der fahrzeugstabilen Datenbrillen-Anzeige festgestellt ( $t(32)=2,54$ ,  $p<0,017$ ). Auch die Bearbeitungsgeschwindigkeit bei der Verkehrsmeldungs-Aufgabe ist für das HUD signifikant schneller als mit der fahrzeugstabilen ( $t(32)=2,18$ ,  $p<0,017$ ) und kopfstabilen ( $t(32)=2,14$ ,  $p<0,017$ ) Datenbrillen-Anzeige. Beim Abrufen persönlicher Nachrichten wurde zunächst ein signifikanter Einfluss des Anzeigeorts festgestellt ( $F(1,74, 53,84)=4,0$ ,  $p<0,05$ )<sup>13</sup>. Nachfolgende t-Tests zeigten, dass bei dieser Aufgabe die Bearbeitungsgeschwindigkeit

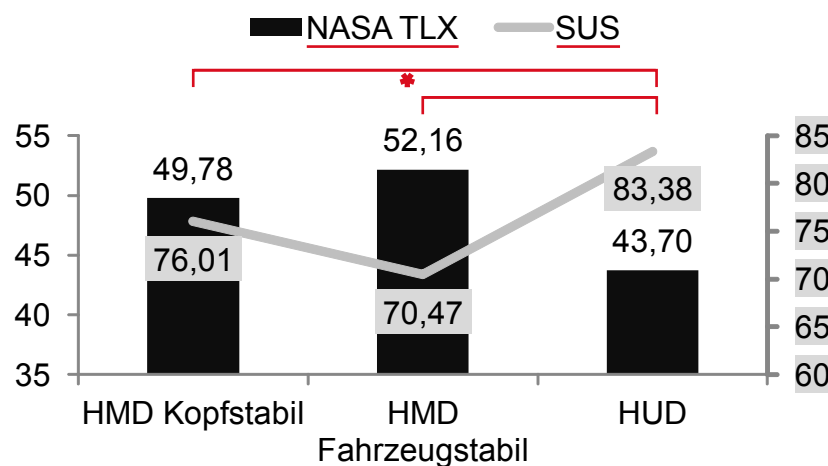
<sup>13</sup> Die Sphäritätsvoraussetzung wurde hier verletzt, daher wurden die Freiheitsgrade mittels einer Huynh-Feldt-Korrektur entsprechend adjustiert

bei der kopfstabilen Datenbrillen-Anzeige signifikant schneller ist als bei der fahrzeugstabilen Anzeige in der Datenbrille ( $t(32)=3.40$ ,  $p<0,017$ ).

Die durchschnittliche Fehleranzahl bei der Bearbeitung der Aufgaben (siehe Abbildung 5.32) ist unabhängig von der Anzeigetechnik sehr niedrig und unterscheidet sich zwischen den Bedingungen aufgrund relativ hoher Standardabweichungen auch nicht signifikant voneinander. Im Unterschied zur Bearbeitungszeit wurden hier jedoch für die HUD-Bedingung minimal höhere Werte gemessen als für die Datenbrillen-Bedingungen.



**Abbildung 5.32:** Durchschnittliche Fehleranzahl bei der Bearbeitung der Aufgaben für die verschiedenen Stabilisierungstechniken.



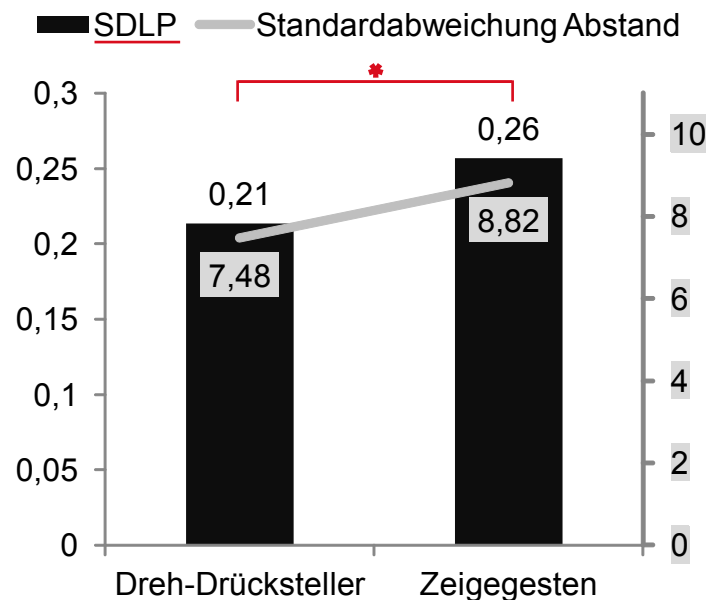
**Abbildung 5.33:** Werte für NASA RTLX und SUS für die verschiedenen Stabilisierungstechniken. Mit einem (\*) gekennzeichnete Paare sind für beide abhängigen Variablen signifikant verschieden.

Bei der Analyse der Antworten in den standardisierten Fragebögen NASA-RTLX und SUS (siehe Abbildung 5.33) wurden ebenfalls Varianzanalysen und paarweise t-Tests durchgeführt, um eventuelle Unterschiede zwischen den Bedingungen zu identifizieren.

Bezüglich der subjektiv empfundenen Auslastung (NASA RTLX) tritt hier ein signifikanter Haupteffekt der Anzeigetechnik ( $F(2,70)=10,9$ ,  $p<0,05$ ) auf. Paarweise Vergleiche zeigen, dass die subjektive Arbeitsbelastung dabei signifikant geringer ist, wenn die Interaktion

auf dem HUD stattfand, als mit der kopfstabilen ( $t(36)=3,27$ ,  $p<0,017$ ) oder cockpitstabilen ( $t(36)=4,29$ ,  $p<0,017$ ) Anzeige. Auch bezüglich der Usability (SUS) wurde ein signifikanter Einfluss der Anzeigen-Stabilisierung festgestellt ( $F(2,70)=21,38$ ,  $p<0,05$ ). Hier sind die Werte für die Anzeige mit dem HUD jeweils signifikant höher als mit fahrzeugstabilen ( $t(36)=6,05$ ,  $p<0,017$ ) und kopfstabilen ( $t(36)=3,83$ ,  $p<0,017$ ) Anzeigen auf der Datenbrille. Außerdem erhielt die fahrzeugstabile Datenbrillen-Anzeige hier eine signifikant geringere Wertung als cockpitstabile Anzeigen ( $t(36)=3,01$ ,  $p<0,017$ ) auf der Datenbrille.

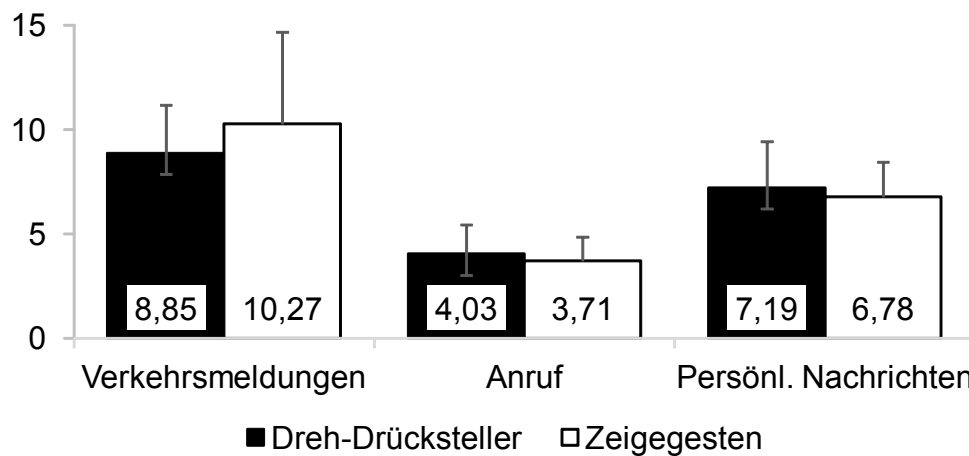
Bezüglich der **Eingabemodalität** wurde ein signifikanter Effekt auf die Querverführung des Fahrzeugs gemessen ( $F(1,30)=5,60$ ,  $p<0,05$ ). Demnach waren die SDLP-Werte signifikant höher, wenn das System mit Zeigegestik bedient wurde, als bei der Benutzung des Dreh-Drückstellers. Ein signifikanter Effekt auf die Längsführung konnte nicht festgestellt werden (siehe Abbildung 5.34).



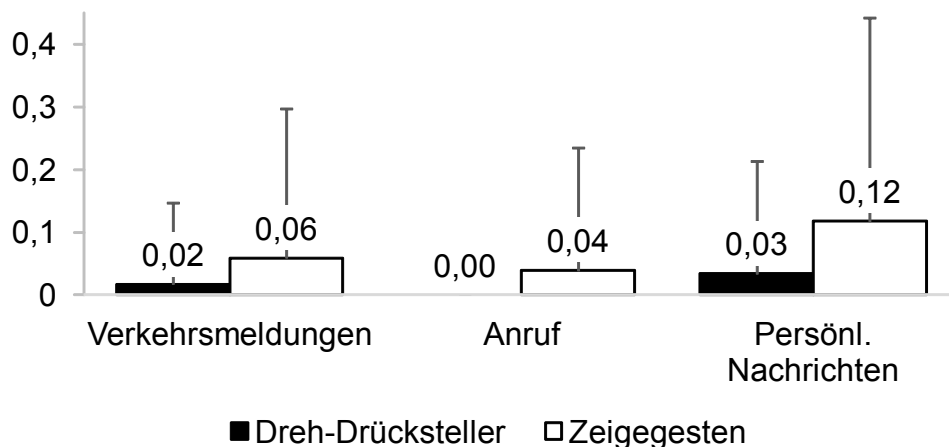
**Abbildung 5.34:** Bearbeitungsgeschwindigkeit der Aufgaben unter Verwendung der verschiedenen Eingabemodalitäten. Die mit einem (\*) gekennzeichnete signifikant unterschiedliche Paarung gilt für die Querverführung (SDLP).

Bezüglich der Leistungen in der Sekundäraufgabe konnte kein signifikanter Einfluss der Eingabemodalität festgestellt werden. Für die Bedienung mit dem Dreh-Drücksteller wurden zwar durchschnittlich etwas höhere Werte bezüglich der Aufgabenbearbeitungszeit (mit Ausnahme des Verkehrsmeldungen-Anwendungsfalls, siehe Abbildung 5.35) und etwas geringere durchschnittliche Fehlerraten (Abbildung 5.36) gemessen. Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Ein signifikanter Einfluss der Bedienmodalität wurde jedoch bei der subjektiv empfundenen Auslastung (siehe Abbildung 5.37) festgestellt: Wurden die Anzeigen mit dem Dreh-Drücksteller bedient, ist diese signifikant niedriger, als wenn die Bedienung über Handgesten erfolgte ( $t(109)=3,2$ ,  $p<0,05$ ). Auch wenn für den Dreh-Drücksteller auch etwas höhere Usability-Werte (SUS) gemessen wurden als mit der Bedienung mittels Handgesten, ist dieser Unterschied nicht signifikant.

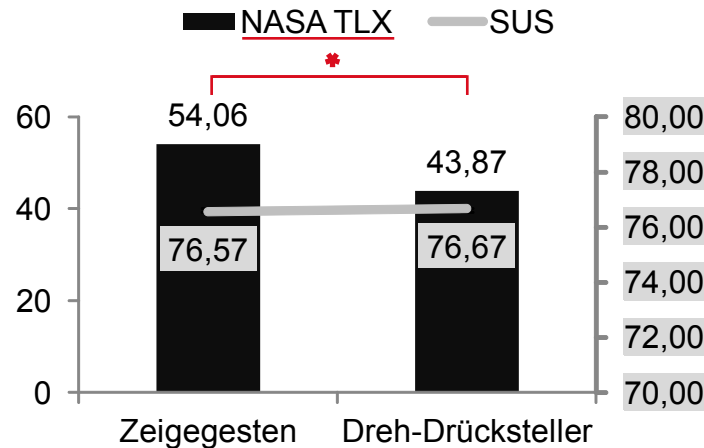


**Abbildung 5.35:** Bearbeitungsgeschwindigkeit der Aufgaben mit den verschiedenen Eingabemodalitäten.



**Abbildung 5.36:** Durchschnittliche Fehleranzahl bei der Bearbeitung der Aufgaben für die verschiedenen Eingabemodalitäten.

Bei der Auswertung der Likert-Skalen, in denen die Versuchspersonen auf einer Skala von 1 („Stimme überhaupt nicht zu“) bis 5 („Stimme vollkommen zu“) die erlebten Systeme bezüglich Lesbarkeit, Ruhe der Anzeigen, Verdeckungspotenzial und subjektiv empfundener Ablenkung bewerten sollten, wurden ebenfalls signifikante Einflüsse der Anzeigenstabilisierung auf die Bewertung durch die Probanden festgestellt (siehe auch Abbildung 5.38). Bezüglich der subjektiv empfundenen Ablenkung ( $F(2,70)=10,2$ ,  $p<0,05$ ) wurden nach paarweisen Vergleichen mittels t-Test für verbundene Stichproben signifikante Unterschiede jeweils zwischen der Anzeige im HUD und kopfstabilen ( $t(36)=3,2$ ,  $p<0,017$ ) sowie fahrzeugstabilen ( $t(36)=3,6$ ,  $p<0,017$ ) Anzeigen in der Datenbrille festgestellt. Bei der Frage nach der Ablesbarkeit ( $F(2,70)=28,0$ ,  $p<0,05$ ) wurden ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen der Anzeige auf dem HUD und fahrzeugstabilen ( $t(36)=6,8$ ,  $p<0,017$ ) beziehungsweise kopfstabilen ( $t(36)=5,3$ ,  $p<0,017$ ) Anzeigen auf der Datenbrille identifiziert. Ebenfalls signifikant ist der Unterschied zwischen kopfstabilen und fahrzeugstabilen Anzeigen auf der Datenbrille ( $t(36)=3,0$ ,  $p<0,017$ ). Auch bezüglich der Verdeckung von Objekten in der Umgebung durch die virtuellen Anzeigen ( $F(2,70)=8,9$ ,  $p<0,05$ ) er-



**Abbildung 5.37:** Werte für NASA RTLX und SUS für die verschiedenen Eingabemodalitäten. Es besteht ein signifikanter Unterschied bezüglich der subjektiven Arbeitsbelastung (NASA RTLX) zwischen der Bedienung mit Zeigegesten und dem ZBE.

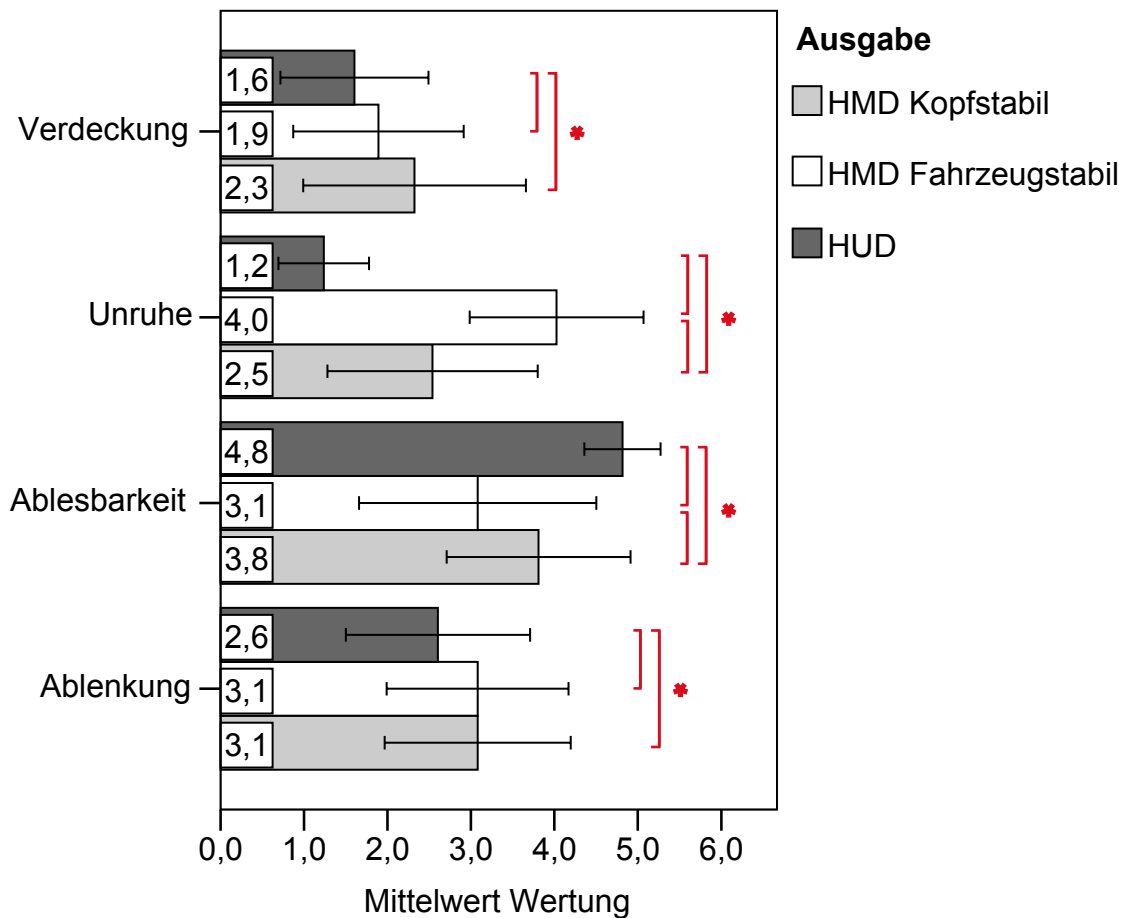
geben paarweise t-Tests signifikante Unterschiede zwischen dem HUD und kopfstabilen ( $t(36)=4,0$ ,  $p<0,017$ ) beziehungsweise fahrzeugstabilen ( $t(36)=2,8$ ,  $p<0,017$ ) Anzeigen auf der Datenbrille. Weitere signifikante Unterschiede wurden schließlich bezüglich der Kategorie „Unruhe der Anzeigen“ ( $F(2,70)=82,6$ ,  $p<0,05$ ) zwischen dem HUD und kopfstabilen ( $t(36)=5,8$ ,  $p<0,017$ ) sowie cockpitstabilen ( $t(36)=15,6$ ,  $p<0,017$ ) Anzeigen auf der Datenbrille identifiziert. Der Unterschied zwischen cockpitstabilen und kopfstabilen Anzeigen auf der Datenbrille ist ebenfalls signifikant ( $t(36)=6,2$ ,  $p<0,017$ ). Der Einfluss der Eingabemodalität ist bezüglich keiner der angesprochenen Kategorien signifikant.

**Interaktionseffekte** zwischen Eingabemodalität und Anzeigetechnik wurden bezüglich keiner gemessenen Variable festgestellt.

### 5.3.3 Diskussion

In diesem Kapitel wurde ein Interaktionskonzept vorgestellt, welches so entwickelt wurde, dass es die Eigenschaften einer Datenbrille möglichst gut nutzt. Besonderen Wert wurde dabei darauf gelegt, dass alle Interaktionsabläufe in möglichst kurzer Zeit abgeschlossen werden können. So sollte eine Bedienung ohne Blickabwendung für häufig genutzte Funktionen während der Fahrt gewährleistet werden können. Die Inhalte werden dabei nur dann in der Datenbrille angezeigt, wenn sie auch wirklich benötigt werden: der Interaktionswunsch des Nutzers wird dabei durch einen Sensor in der Mittelkonsole erkannt.

Bezüglich der Fahrdaten konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen fahrzeugstabilen und kopfstabilen Anzeigen identifiziert werden. Auch im Vergleich zum technisch wesentlich ausgereifteren HUD waren hier keine Unterschiede feststellbar. Die geringsten Werte wurden sowohl bei der Längs- als auch bei der Querführung für die Bedienung mit den fahrzeugstabilen Datenbrillenanzeigen gemessen. Scheinbar wirkte sich hier die technische Unreife der Darstellungsmittel nicht negativ auf die Erfüllung der Primäraufgabe aus.



**Abbildung 5.38:** Probandeneinschätzungen der Anzeigetechniken bezüglich verschiedener Kategorien. Signifikant unterschiedliche Paare sind mit einem (\*) gekennzeichnet.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für die Leistungen in der Sekundäraufgabe wurden aufgabenabhängig teilweise signifikant schnellere Bearbeitungszeiten für das HUD im Vergleich zur fahrzeugstabilen Anzeige und für die kopfstabile Anzeige im Vergleich zur cockpitstabilen Anzeige gemessen. Eine ähnliche Tendenz wurde bezüglich der subjektiven Bewertungen durch die Probanden festgestellt. So wurden die Systeme schlechter bewertet, je geringer deren technische Reife ist. So war die Bewertung von Anzeigen im HUD tendenziell besser als die von kopfstabilen Anzeigen, welche wiederum besser als fahrzeugstabile Anzeigen (Datenbrille mit Tracking!) bewertet wurden. Wie groß der Einfluss der technologischen Qualität der Prototypen tatsächlich ist, wird auch deutlich, wenn fahrzeugstabile Anzeigen auf der Datenbrille mit Anzeigen auf dem HUD verglichen werden.

Werden die Studiendaten bezüglich eines Einflusses der Eingabemodalitäten untersucht, so fällt zunächst auf, dass die Probanden keine ernsthaften Probleme bei der Bedienung des Systems mittels Zeigegesten hatten. Selbst im Vergleich zu dem jahrelang perfektionierten Dreh-Drücksteller konnten hinsichtlich der Leistungen in der Sekundäraufgabe keinerlei signifikante Unterschiede identifiziert werden. Auch die Qualität der Längsführung des Fahrzeugs litt nicht unter der ungewohnten Eingabemodalität. Lediglich die Querführung des Fahrzeugs war bei der Bedienung mittels Zeigegesten signifikant schlechter, als wenn

das System mit dem Dreh-Drücksteller bedient wurde. Dieses Ergebnis scheint durch eine weitere abhängige Variable bestätigt zu werden: Die von den Probanden subjektiv empfundene Auslastung bei der Bedienung mit Zeigegesten war ebenfalls signifikant höher als bei der Bedienung mit dem Dreh-Drücksteller. Dennoch wäre es auch möglich, dass die horizontalen Bewegungen mit der rechten Hand eine automatische, ungewollte Lenkbewegung mit der linken Hand zur Folge hatte. Eine Überprüfung dieser Theorie wäre besonders für das Forschungsfeld der Gestenbedienung im Fahrzeug wichtig.

Bei keiner der abhängigen Variablen trat ein Interaktionseffekt zwischen Anzeigetechnik und Bedienmodalität auf. Somit kann an dieser Stelle keine Aussage darüber gemacht werden, ob eine Interaktionsmodalität für eine bestimmte Anzeigeform besonders geeignet oder ungeeignet ist. Bemerkenswert ist dieses Ergebnis eventuell im Kontext fahrzeugstabiler Anzeigen: eine wechselseitige Verstärkung der Auswirkungen unreifer Tracking-Technologie war zumindest bei diesem Versuch nicht messbar.

Letztlich deuten die Versuchsdaten darauf hin, dass für interaktive Anzeigen während der Fahrt fahrzeugstabile Anzeigen den kopfstabilen vorzuziehen sind. Um diese allerdings in der Datenbrille überzeugend darstellen zu können, bleiben jedoch sowohl weitere Fortschritte in der Anzeige- als auch in der Trackingtechnologie abzuwarten.

Eine wichtige Annahme, die bei der Entwicklung eines Interaktionskonzepts für die Datenbrille immer eine Rolle spielt, ist das vermeintlich bessere Blickverhalten des Fahrers. Wie in Kapitel 2.1.5 bereits ausgeführt wurde, ist eine Messung der Blickabwendungszeiten und -häufigkeiten bei gleichzeitigem Tragen der Datenbrille derzeit jedoch nicht möglich. Lediglich basierend auf den in der HUD-Forschung gewonnenen Blickdaten kann möglicherweise für gleichwertige (positionsgleiche fahrzeugstabile) Anzeigen in einer Datenbrille von ähnlichen Effekten wie bei der Benutzung eines HUD ausgegangen werden.

Bei der Interaktion mit Inhalten auf einer Datenbrille wurden keine Unterschiede bezüglich der Fahrleistung zwischen kopf- und fahrzeugstabilen Inhalten festgestellt. Dennoch, das zeigt der Vergleich mit einem modifizierten HUD, sollten für interaktive Anwendungen auf der Datenbrille eher fahrzeugstabile Anzeigen verwendet werden. Die Leistungen in der Sekundäraufgabe und die subjektiven Bewertungen lassen jedoch auf große Auswirkungen der technischen (Un-)Reife der Datenbrillentechnologie schließen. Der negative Einfluss von horizontalen Zeigegesten auf die Querführung des Fahrzeugs könnte sowohl mit höherer (kognitiver) Last als auch mit koordinationsbedingten, unwillkürlichen Lenkbewegungen zusammenhängen.



## 5.4 Indirekte Interaktion am Lenkrad via Touchpad und Lenkradtasten

Kapitel 5.4 basiert auf der Masterarbeit „Entwicklung und Evaluation eines Interaktionskonzepts für halbtransparente Displays im Automobil“ von Felix Praschak. Themenstellung, das zugrundeliegende Interaktionskonzept sowie die Betreuung der Arbeit wurde von Felix Lauber geleistet. Maßgebliche Teile des endgültigen Konzepts, die Programmierung des Prototypen, Durchführung und Auswertung der Studie stammen von Felix Praschak.

### 5.4.1 Motivation

Die bisher beschriebenen Anzeige- und Interaktionskonzepte wurden ausnahmslos entwickelt, um den Fahrer während der Fahrt bestmöglich zu unterstützen. Die wichtigste Aufgabe des Konzeptentwicklers ist dabei immer sicherzustellen, dass die Fahraufgabe trotz gleichzeitiger Durchführung einer Sekundäraufgabe immer noch in ausreichender Qualität bewältigt werden kann. Mit der steigenden Qualität der Fahrassistenzsysteme und der Möglichkeit sowohl Quer- als auch Längsführung des Fahrzeugs zumindest während einigen Fahrsituationen (zum Beispiel beim Fahren in einem Stau) vollständig ohne die Mitwirkung des Fahrers durchzuführen, könnten sich jedoch auch die Anforderungen an die Anzeige- und Bedienkonzepte ändern. Einerseits wird sich der Fahrer, der in diesen Situationen nun weitestgehend beschäftigungslos ist, anderen Tätigkeiten widmen wollen. Andererseits muss auch sichergestellt werden, dass er in Situationen, die das System nicht automatisiert bewältigen kann, schnell in das Fahrgeschehen eingreifen kann. Hierzu wird es wichtig sein, dass der Fahrer, obwohl er eigentlich mit einer anderen Tätigkeit beschäftigt ist, noch möglichst viel vom Fahrgeschehen mitbekommt, um im Ernstfall schnellstmöglich die richtige Entscheidung treffen zu können. Dadurch, dass der Mensch vermutlich in der Lage ist Informationen gleichzeitig foveal und peripher wahrzunehmen und zu verarbeiten (siehe Kapitel 2.2), könnte die Nutzung von Datenbrillen diesbezüglich Vorteile bringen. Aber auch ergonomische Überlegungen spielen hier eine Rolle: die Fahrbeziehungswise Übernahmebereitschaft des Fahrers kann nicht nur wahrnehmungsspezifisch sondern auch motorisch unterschiedlichen Rahmenbedingungen unterworfen sein. Hat der Fahrer während der Interaktion mit Sekundäraufgaben beide Hände am Lenkrad, ist seine Fahrbereitschaft vermutlich schneller wiederhergestellt, als wenn diese erst dorthin bewegt werden müssen.

Im Folgenden wird ein Anzeige- und Bedienkonzept für erweiterte Infotainment-Funktionen vorgestellt, das diese Überlegungen berücksichtigt. Das System wird dabei ausschließlich am Lenkrad bedient, die grafische Ausgabe wird über eine Datenbrille vorgenommen. Nach der prototypischen Umsetzung des Konzepts, werden die Leistungen in der Sekundäraufgabe und die qualitativen Eindrücke der Probanden auf eventuelle Effekte der Bedien- und Ausgabemodalität in einer Probandenstudie untersucht. Die subjektive Einschätzung der Fahrer bezüglich der Fähigkeit, die Umgebung trotzdem noch im Blick

zu behalten, um im Ernstfall eingreifen zu können, wird anschließend ebenfalls mit Hilfe einer entsprechenden Situation im Fahrsimulator überprüft.

Bei einem Szenario, in dem die Fahraufgabe weitestgehend vom Fahrzeug übernommen werden kann und die Aufgabe des Fahrers sich primär auf das Überwachen dieser beschränkt, ist die Trennung zwischen Primär- und Sekundäraufgabe nicht mehr so eindeutig wie bei Szenarios, in denen der Fahrer die Fahraufgabe selbst übernehmen muss. In den folgenden Kapiteln ist, sofern von einer Sekundäraufgabe geschrieben wird, aus Konsistenzgründen trotzdem die Interaktion mit fahrfremden Inhalten gemeint während die Überwachung der Fahrt als Primäraufgabe bezeichnet wird.

### 5.4.2 Konzept

**Bedienmodalitäten und Anwendungsfälle** Neben dem Einsatz der Datenbrille als Ausgabetechnologie war eine wichtige Prämisse für die Entwicklung des Konzepts, dass die indirekte Bedienung der Inhalte so erfolgen soll, dass beide Hände während der Interaktion am Lenkrad verweilen können. Als eine vielversprechende Alternative zu den bereits existierenden Bedienelementen am Lenkrad, wurde dabei ein Touchpad angesehen. Im Gegensatz zum Einsatz eines Knurls und entsprechenden Knöpfen erlaubt die Verwendung eines Touchpads sehr viel mehr Flexibilität bezüglich der Abbildung von Funktionen. Knöpfe können zwar auch mehrfach mit Funktionen belegt werden, deren Anordnung bleibt jedoch stets die gleiche, weswegen eine Funktionsüberladung eher zu Verwirrung führen könnte. Der Nachteil von indirekter Touch-Interaktion gegenüber fest verbauten Bedienelementen ist jedoch die fehlende haptische Rückmeldung über den Bedienvorgang. Dieser Nachteil wurde bei der Entwicklung eines Konzepts für indirekte Touch-Interaktion für das HUD auch bereits von Spies et al. erkannt und konzeptionell entsprechend eingearbeitet [154]. Sie entwickelten einen indirekten Touch-Controller für HUD-Anzeigen, welcher haptisches Feedback durch eine Art Braille-Anzeige vermittelt und so dem interagierenden Finger entsprechend Rückmeldung gibt.

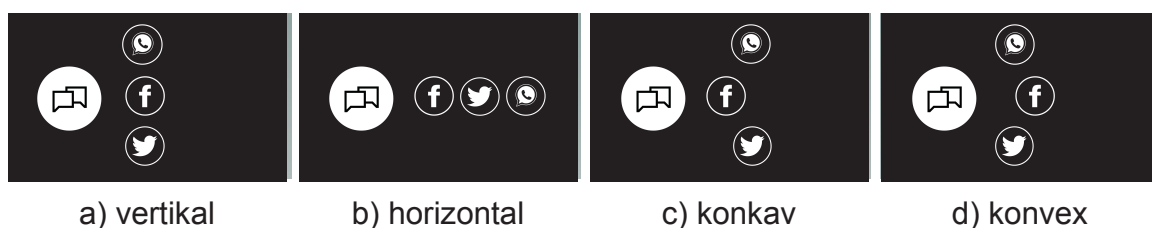
Um in dem hier entwickelten Konzept den angesprochenen Nachteilen indirekter Touch-Interaktion auf konzeptioneller Ebene zu begegnen, basiert das folgende Konzept auf der Integration zweier unterschiedlicher Varianten haptischer Rückmeldung. Zum einen wird versucht die Orientierung des Fingers auf dem Touchpad durch das Ausnutzen *geometrischer* Eigenschaften zu erleichtern. Dadurch, dass die erste Menüebene entlang der physikalischen Kante des Bedienteils angeordnet werden, hat der interagierende Finger hier bereits ein erstes Indiz über seine Position auf dem Touchfeld. Zum anderen wird die Suche (also die Vorauswahl) der Funktionen neben der visuellen Ausgabe auf der Datenbrille durch *Vibrationsfeedback* unterstützt. Hierdurch wird insbesondere einem unbemerkten Über- oder Untersteuern bei den Bewegungen des Fingers auf dem Touchpad entgegengewirkt, da ein Wechsel der aktiven Funktion fühlbar wird.

Als alternative Bedienmodalität wurde eine Bedienung mittels Lenkradtasten und -Knurl entwickelt.

Das Bedienkonzept ist grundsätzlich darauf ausgerichtet die Bedienung von Infotainment-Funktionen zu ermöglichen, die traditionellerweise nicht oder nur eingeschränkt im Fahrzeug existieren. Dazu gehören neben einer Funktion für die Verwaltung und Wiedergabe

von Musik beispielsweise auch die Nutzung umfangreicher Kommunikationsmöglichkeiten (beispielsweise mittels sozialen Netzwerken oder Kurznachrichten-Diensten) oder eines Internet-Browsers. Den Funktionen wurde dabei eine hierarchische Menüstruktur zugrunde gelegt. Weitere interaktive Inhalte sind interaktive Listen sowie eine Möglichkeit zur Eingabe kurzer Texte. Um diese Funktionen mit den entsprechenden Ein- und Ausgabemodalitäten evaluieren zu können, wurden zwei Anwendungen implementiert: die Bedienung eines Musik-Players und die Kommunikation über ein soziales Netzwerk. Sowohl die grundsätzliche Navigation innerhalb der Haupt- und Untermenüs als auch die Auswahl in verschiedenen Listen und die Eingabe kurzer Texte können hierbei praxisnah erprobt werden.

**Menüstruktur** Nachdem für die Struktur des Hauptmenüs bereits eine vertikale Anordnung der Funktionen entlang der inneren Kante des Touchpads festgelegt wurde, wurden in einer kleinen Studie (N=8) vier verschiedene Varianten einer möglichen Struktur für das Untermenü (siehe Abbildung 5.39) verglichen. Dabei bevorzugten 75% der Probanden eine horizontale Anordnung des Untermenüs.



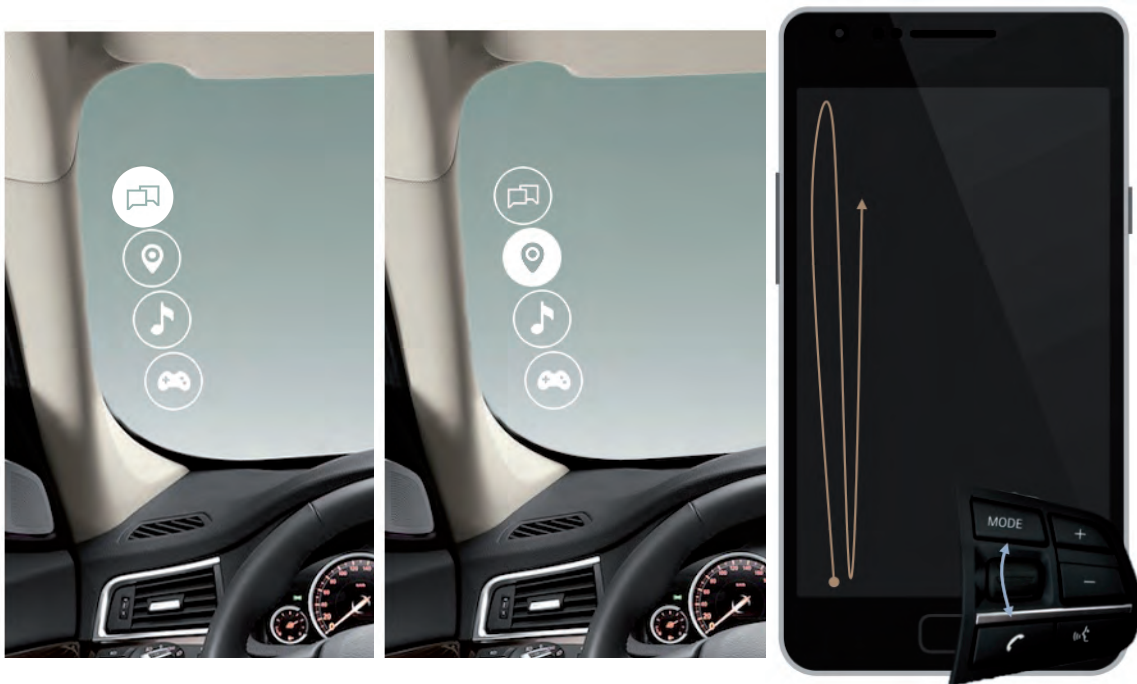
**Abbildung 5.39:** Verschiedene Layout-Varianten des Untermenüs. Abbildung nach [124].

Das Hauptmenü wird wie in Abbildung 5.40 dargestellt durch eine Auf- beziehungsweise Abwärtsbewegung des Fingers auf dem Touchpad oder einer Drehbewegung mit dem Knurl bedient.

Ist das gewünschte Element ausgewählt, wird das Untermenü durch eine nach außen gerichtete Bewegung auf dem Touchpad beziehungsweise durch Druck auf das Knurl aktiviert.

Durch entsprechende horizontale Bewegungen auf dem Touchpad können die Funktionen des Untermenüs (beispielsweise ein Kurznachrichtendienst) selektiert werden. Sobald der Cursor auf einer Funktion liegt, öffnen sich deren Unterfunktionen wiederum in einem vertikalen Untermenü. Anschließend wird durch eine Auf- oder Abwärtsbewegung die Unterfunktion der entsprechend ausgewählten Funktion (beispielsweise ein Kurznachrichtendienst zum Schreiben) selektiert. Ist die gewünschte Unterfunktion selektiert („zum schreiben“), so kann diese durch Abheben des Fingers geöffnet werden (Lift-Off-Strategie). Der Finger darf dabei während der gesamten Bewegung, vom Zeitpunkt des erstmaligen Aufsetzens des Fingers bis zum Öffnen der Unterfunktion, nicht abgesetzt werden.

**Listenbedienung** Die Interaktion in Listen wird durch Auf und Abwärtsbewegungen des Fingers auf dem Touchpad realisiert. Hierbei wird der Finger nach jedem „Blättern“ neu aufgesetzt. Durch „Tippen“ auf ein Listenelement kann es anschließend ausgewählt werden. Alternativ erfolgt die Bedienung durch entsprechendes Drehen beziehungsweise Drücken (Selektion) des Knurls. Im Falle des Musik-Players (siehe Abbildung 5.41), der



**Abbildung 5.40:** Interaktion im Hauptmenü. Durchschalten der Elemente durch Drehen am Knurl beziehungsweise Streichen des Fingers entlang der inneren Kante des Touchpads. Abbildung nach [124].

ebenfalls auf der Interaktion mit Listen basiert, kann zusätzlich, durch Auf- beziehungsweise Abwärtsstreichen am äußeren Rand des Touchpads, die Lautstärke verändert werden. Im Falle der Bedienung durch das Knurl müssen für diese Funktion zwei weitere Tasten miteinbezogen werden.

Eine Anwendung wird im Falle des Touchpads durch eine Wischgeste von außen nach innen beendet. Im Falle des Knurls, wird hierfür eine weitere Taste („Mode“) genutzt. Mit dieser Taste wird im Falle der Knurl-Bedienung auch der Schritt in die nächsthöhere Menüebene gemacht. Dies ist im Falle der Bedienung durch das Touchpad nicht nötig, da das Menü beim Abheben des Fingers in ihren Ursprungszustand versetzt wird, solange sich der Nutzer noch nicht innerhalb einer Unterfunktion befindet.

**Texteingabe** Bedingt durch die Auswahl der Anwendungsfälle, war es notwendig eine Möglichkeit zur Texteingabe auf der Datenbrille zu schaffen. Auch auf dem Markt erhältliche Systeme wie die Epson Moverio BT-100 greifen auf die indirekte Interaktion mit einem Touchpad zurück. Text wird dabei über eine in der Datenbrille dargestellte QWERTZ-Tastatur eingegeben. Hierzu wird mit dem mitgelieferten Touchpad ein Cursor gesteuert, der zunächst auf die entsprechenden Tasten bewegt werden muss, woraufhin dann durch ein Tippen auf das Touchpad beziehungsweise eine benachbarte Taste die Auswahl bestätigt wird. Diese Art der indirekten Interaktion ist relativ langsam und mühevoll, da der Cursor gegebenenfalls nur durch mehrmaliges Nachfassen auf die gewünschte Taste bewegt werden kann.

Eine ähnliche Möglichkeit zur Texteingabe wurde auch für dieses Konzept entwickelt. Auch hier wurde eine QWERTZ-Tastatur zugrunde gelegt, da sie gegenüber alternativen

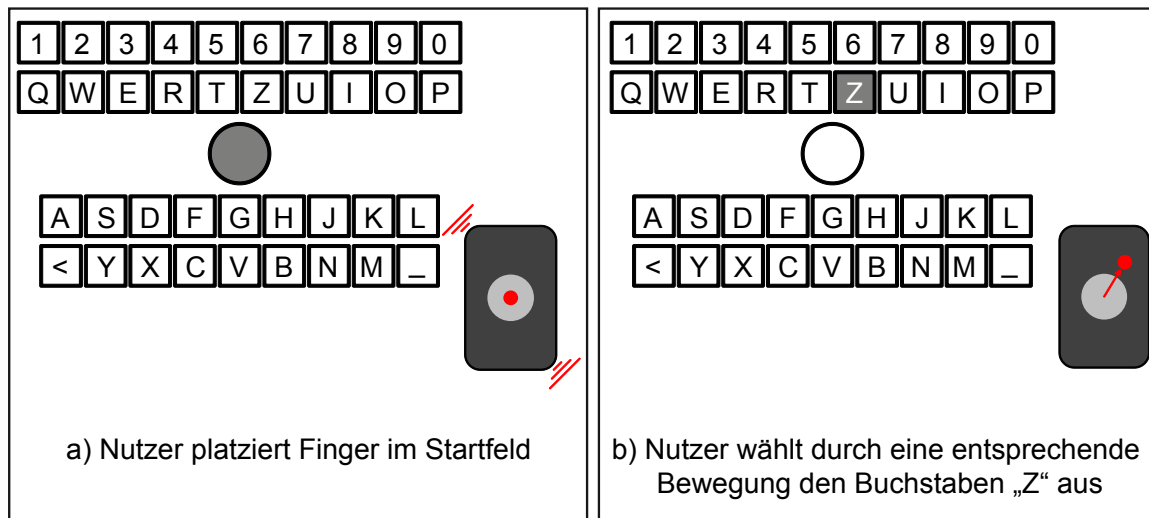


**Abbildung 5.41:** Interaktion im Hauptmenü. Durchschalten der Elemente durch Drehen am Knurl beziehungsweise Streichen des Fingers entlang der inneren Kante des Touchpads. Abbildung nach [124].

(und möglicherweise auch performanteren) Tastatur-Layouts einige Vorteile bietet. In einer Studie wird sie sofort von jedem Probanden verstanden, die Bedienung kann sehr einfach auf verschiedene Bedienmodalitäten portiert werden (Knurl, Dreh-Drücksteller) und durch die rechteckige Form lässt sie sich relativ mühelos auf den (ebenfalls rechteckigen) Anzeigebereich der Datenbrille sowie die Form des Touchpads abbilden.

In der hier implementierten Variante wird die Tastatur zunächst horizontal in zwei etwa gleich große Teile geteilt (siehe Abbildung 5.42). Im Zentrum der Tastatur befindet sich der Startpunkt, welcher auch auf dem Touchpad über eine Repräsentation verfügt. Befindet sich der Finger innerhalb dieses Startpunkts, wird dies dem Nutzer visuell (Startpunkt wird ausgefüllt) und haptisch (durch eine kurze Vibration des Touchpads) mitgeteilt. Der Nutzer bewegt nun den Finger in Richtung des nächsten auszuwählenden Buchstabens. Dabei wird ein virtueller Auswahlbereich analog zur Fingerbewegung innerhalb der Tastatur auf der Datenbrille verschoben. Wird der Finger vom Touchpad abgehoben, so wird der Buchstabe dem aktuell verfassten Text hinzugefügt und ein neuer Interaktionsablauf kann beginnen (siehe Abbildung 5.42).

In einer kleinen Studie ( $N=10$ ) wurden Probanden gebeten einen kurzen Satz mit 31 Zeichen in das System einzugeben. Dabei wurde sowohl ein Dreh-Drücksteller mit entsprechenden (runden) Tastaturlayout, wie es heute in vielen Fahrzeugen eingesetzt wird, benutzt, als auch das neu entwickelte System mit dem Touchpad. Hierbei wurden ohne vorherige Übungszeit fast identische Schreibgeschwindigkeiten (Zeichen pro Minute) für die Touchinteraktion gemessen ( $M=28,21$ ,  $SD=7,8$ ) wie für die Interaktion mittels Dreh-Drücksteller ( $M=28,20$ ,  $SD=3,3$ ).



**Abbildung 5.42:** Indirekte Interaktion mit der Tastatur. Der Nutzer bewegt einen virtuellen Cursor auf eine Taste indem er eine entsprechende Bewegung (roter Punkt) ausführt. Der Buchstabe wird ausgewählt indem der Nutzer seinen Finger vom Touchpad abhebt.

### 5.4.3 Studie

**Studiengegenstand und Design** Die Studie gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil wurde die Eingabemodalität *indirektes Touch* der Eingabe mittels MFL-Tasten beziehungsweise Knurl gegenübergestellt. Dabei erlebten alle Versuchspersonen beide Bedingungen in zwei getrennten Fahrten. Gleichzeitig sollte erneut ein möglicher Einfluss der Ausgabemodalität auf die Interaktion und die subjektiven Meinungen der Probanden untersucht werden. Hierzu wurde das Versuchspersonenkollektiv in drei Gruppen eingeteilt: während eine Gruppe die Anzeigen ausschließlich auf der Datenbrille (kopfstabile Anzeigen) erlebte, wurde in der zweiten beziehungsweise dritten Gruppe nur das HUD beziehungsweise das Kombiinstrument als Ausgabemodalität verwendet. Es handelt sich also um ein Mixed-Studiendesign mit der Intrasubjektvariable *Eingabemodalität* und der Intersubjektvariable *Ausgabemodalität*. Die Reihenfolge der Konzepte wurde dabei abgewechselt, um Einflüsse wie Gewöhnungseffekte auf die Daten auszuschließen.

Im zweiten Teil der Studie wurde der Einfluss der Ausgabemodalität auf die periphere Wahrnehmung untersucht. Hierzu wurde eine dritte Fahrt am Ende der Studie durchgeführt. In dieser Fahrt wurde die Ausgabemodalität verwendet, die bereits in den ersten beiden Fahrten erlebt wurde (Between-Subjects Design). Als Eingabemodalität wurde dabei stets die Bedienung mittels Multifunktionslenkrad verwendet.

**Aufbau** Als Touchpad wurde ein *Samsung Galaxy Nexus i9250* Smartphone auf der rechten Seite des Lenkrads montiert. Vom Betriebssystem festgelegte Funktionen (unterer und oberer Bereich) wurden abgeklebt, um ein versehentliches Auslösen einer entsprechenden Taste zu vermeiden. Dadurch verringerte sich die effektiv nutzbare Bildschirm-diagonale von 11,8 cm auf etwa 9,5 cm. Alternativ wurde ein BMW Tastenblock für ein Multifunktionslenkrad zum Einsatz, wie er auch in aktuellen Modellen, beispielsweise der BMW F10 Baureihe, verwendet wird.



Der Versuch fand in dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen „Statischen Simulator“ statt. Dabei wurde die im gleichen Kapitel beschriebene E60-Sitzkiste in Kombination mit dem ebenfalls beschriebenen HUD-Aufbau verwendet. Alternativ zum dem HUD-Aufbau wurde eine LUMUS DK-32 Datenbrille (Kapitel 3.3.3) verwendet. Für die Fahrten, in denen das Kombiinstrument als Ausgabemodalität genutzt wurde, wurde ein in der Sitzkiste integriertes Display verwendet. Dieses wurde, wie auch der für den HUD-Aufbau benutzte Bildschirm, jeweils auf eine Auflösung von 1280 \* 720 Pixel eingestellt, um die Qualität der Anzeigen denen auf der Datenbrille möglichst genau zu anzugleichen. Zusätzlich wurden die Anzeigen auf beiden Anzeigen so skaliert, dass die Anzeigengröße auf allen drei Ausgabemodalitäten bezüglich des Betrachtungswinkels gleich groß war. Je nach Anwendungsfall beziehungsweise Umfang der Anzeigen nahmen diese einen Winkel von minimal 5,2° vertikal sowie 1,9° horizontal (nur Hauptmenü sichtbar) und maximal 5,8° vertikal sowie 14,2° horizontal (Musikplayer sichtbar) ein.

**Stichprobe** An dem Versuch nahmen insgesamt 57 Probanden teil, davon 39 männlich und 18 weiblich. Das Alter der Versuchspersonen lag zwischen 20 und 59 Jahren ( $M=30,07$ ,  $SD=8,5$ ). Insgesamt 28 Teilnehmer litten an einer Sehbeeinträchtigung, die während des Versuchs durch das Tragen von Kontaktlinsen, einer Brille oder entsprechenden Korrekturgläsern für die Datenbrille (je nach Bedingung) korrigiert wurde. Keiner der Probanden hatte an der Konzeptentwicklung beziehungsweise den ersten Voruntersuchungen mitgewirkt.

**Fahrsituation** Die Probanden hatten die Aufgabe zunächst manuell auf die Autobahn zu fahren und einem Vorderfahrzeug zu folgen. Nach etwa 1,5 Minuten wurden die Versuchspersonen vom Versuchsleiter aufgefordert das Assistenzsystem zur automatischen Quer- und Längsregelung zu aktivieren. Das Egofahrzeug folgte daraufhin automatisch dem Vorderfahrzeug mit einem konstanten Abstand von 100 m bei einer gleichmäßigen Geschwindigkeit von 120 km/h.

**Kritische Situation in letzter Fahrt** Die letzte Fahrt für jeden Probanden diente dazu einen Eindruck über die verbleibende Aufmerksamkeit für das Geschehen in der Peripherie bei gleichzeitiger Interaktion mit den Anzeige Konzepten zu erlangen. Hierzu wurde eine Fahrt konzipiert, die zunächst exakt genauso ablief wie die ersten beiden Fahrten, in denen lediglich die Eingabemodalitäten verglichen wurden. Am Ende der Fahrt wurde den Probanden die Aufgabe gestellt den Text „hallo jan ich komme nicht“ zu schreiben. Während die Probanden diese Aufgabe bearbeiteten, scherte nun das Vorderfahrzeug, im Unterschied zu den vorherigen beiden Fahrten, nach links aus und gab dadurch den Blick auf eine Unfallstelle frei. Hierzu blinkte das Vorderfahrzeug zunächst und vollzog dann mit einer gleichmäßigen Lenkbewegung einen kontrollierten Spurwechsel. Beginnend an dem Zeitpunkt, an dem das Vorderfahrzeug den Spurwechselvorgang durch die erste Lenkbewegung einleitete, wurde nun die Zeit bis zu dem notwendigen Eingriff des Probanden gemessen. Da das Assistenzsystem *nicht* auf die Unfallstelle reagierte, musste der Proband selbständig entweder ebenfalls einen Spurwechsel durchführen oder das Fahrzeug bis zum Stillstand abbremsen. Die Länge der Reaktionszeit wurde als Indikator für das Maß der verbleibenden peripheren Wahrnehmung verwendet: eine längere Reaktionszeit wurde mit einem niedrigeren Maß an peripherer Wahrnehmung in Verbindung gebracht, mit einer kürzeren Reaktionszeit wurde entsprechend ein höheres Maß an peripherer Wahrnehmung assoziiert.

Der Spurwechsel des Vorderfahrzeugs fand dabei 133 m vor der Unfallstelle statt. Bei 120 km/h entspricht dies einer Zeit bis zur Unfallstelle von vier Sekunden. Zusammen mit dem Abstand des Ego- zum Vorderfahrzeugs von weiteren 100 m, hatten die Probanden also insgesamt ein Zeitfenster von sieben Sekunden, um auf die problematische Verkehrssituation zu reagieren.

**Aufgabe und Vorgehen** Nach der Begrüßung der Probanden und der Aufnahme der demographischen Daten wurden die Versuchsteilnehmer gebeten in der Sitzkiste Platz zu nehmen und sich Sitz und Spiegel auf ihre Bedürfnisse einzustellen. Nach einer Probefahrt, in der sich die Probanden sowohl an das manuelle als auch das assistierte Fahren im Simulator gewöhnen konnten, wurden sie in das Bedienkonzept und den Versuchsablauf eingewiesen. Alle Probanden wurden unmittelbar vor jeder Messfahrt eindringlich darauf hingewiesen, dass sie selbst während der assistierten Fahrt ständige Fahrbereitschaft einnehmen müssen, da das System nicht auf jede Verkehrssituation gleichermaßen reagieren könne und ein Eingreifen des Fahrers immer notwendig sein könne.

Nach dem Start einer Messfahrt folgten die Probanden dem Vorderfahrzeug zunächst manuell für etwa drei Kilometer. Nachdem sie das Assistenzsystem aktiviert hatten, folgten insgesamt drei Abschnitte in denen die Probanden eine Sekundäraufgabe bearbeiteten. Jeder dieser Abschnitte wurde durch ein akustisches Signal gekennzeichnet. Vor jedem Abschnitt wurde dem Probanden erklärt, was nach dem nächsten Signal zu tun sei. Die Aufgabenbearbeitung selbst konnte allerdings erst beginnen, wenn der entsprechende Abschnitt befahren wurde. Die erste Aufgabe bestand darin, ein bestimmtes Lied mit maximaler Lautstärke abzuspielen. In der zweiten Aufgabe sollte eine Nachricht eines bestimmten Absenders vorgelesen und in der dritten Aufgabe eine kurze Antwort auf eine Nachricht verfasst werden.

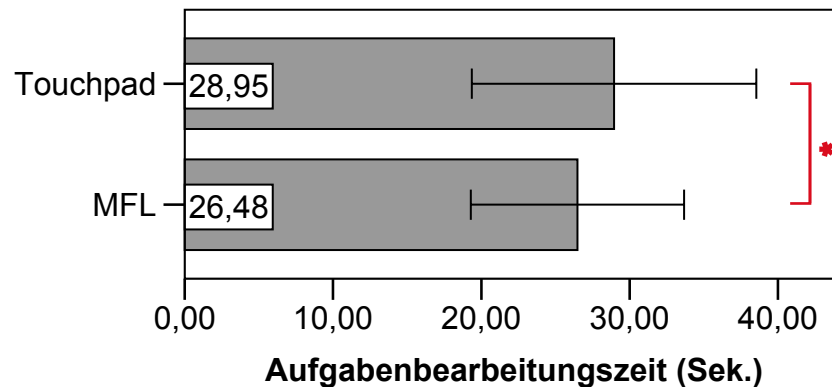
Nach jeder Fahrt füllte jeder Proband einen kurzen Fragebogen aus, in dem die subjektiven Eindrücke zu jeder erlebten Systemkombination gesammelt wurden.

#### 5.4.4 Ergebnisse: Evaluation des Anzeige- und Bedienkonzepts

Die gesammelten Daten wurden auf Einflüsse der Ein- und Ausgabemodalität untersucht. Abhängige Variablen waren dabei die Leistungen in der Sekundäraufgabe (Bearbeitungsgeschwindigkeit und Fehlerrate), die standardisierten Fragebögen SUS und NASA RTLX, sowie die Bewertung mittels fünfstufiger Likert-Skalen bezüglich nicht-standardisierter Kriterien. Um die physikalische Beanspruchung der beiden Interaktionsmodalitäten vergleichen zu können, wurde außerdem die während der Interaktion am Lenkrad angebrachte Kraft protokolliert. Je höher diese ist, desto höher ist die Gefahr die assistierte Fahrt ungewollt zu beenden, da diese vom System ultimativ als Fahrereingriff gewertet werden würde.

**Bedienmodalität** Bezüglich der Bearbeitungszeit der Sekundäraufgabe (Siehe Abbildung 5.43) konnte mittels einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse ein signifikanter Haupteffekt der Eingabemodalität nachgewiesen werden ( $F(1, 54)=5,36$ ;  $p<0,05$ ;  $\eta_p^2 = 0,09$ ). Demnach wurde die Sekundäraufgabe signifikant schneller mit dem MFL ( $M=26,5$  s,  $SD=7,2$ ) bearbeitet als mit dem Touchpad ( $M=28,9$  s,  $SD=9,6$ ).

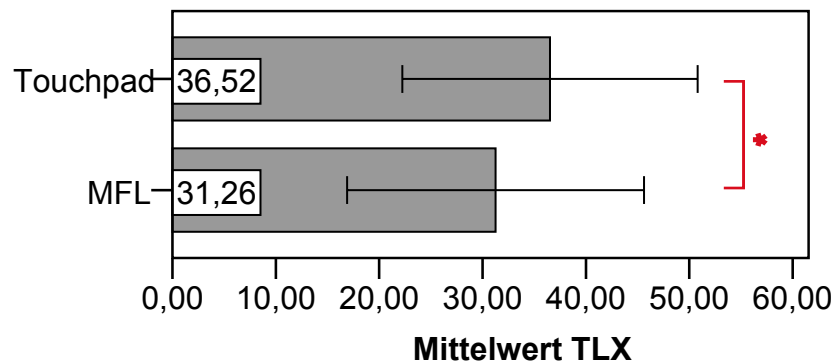




**Abbildung 5.43:** Die durchschnittliche Bearbeitungszeit des Sekundärtasks für die Bedienmodalitäten. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (\*) gekennzeichnet.

Die durchschnittliche Fehleranzahl bei der Bearbeitung der Sekundäraufgabe ist mit dem Touchpad ( $M=12,49$ ,  $SD=12,0$ ) etwas geringer als bei der Interaktion mit dem MFL ( $M=13,09$ ,  $SD=11,0$ ). Dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant.

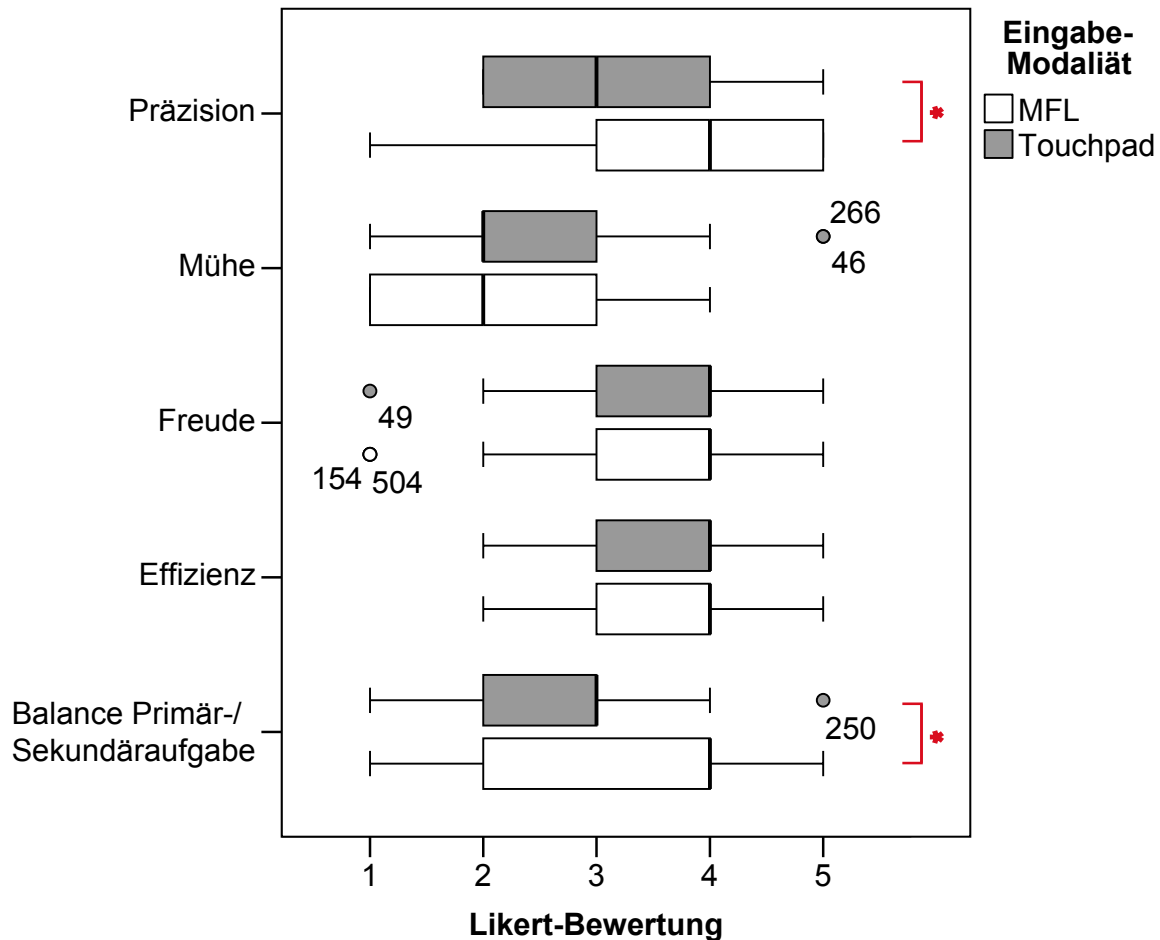
Bei der Bewertung der subjektiv wahrgenommenen Auslastung während der Interaktion (NASA RTLX) unterscheiden sich die beiden Eingabemodalitäten jedoch deutlich voneinander (siehe Abbildung 5.44). So wurde die Auslastung bei der Interaktion mittels MFL ( $M=31,26$ ,  $SD=14,4$ ) als geringer empfunden als bei der Aufgabenbearbeitung mit dem Touchpad ( $M=36,52$ ,  $SD=14,3$ ). Dieser Unterschied ist signifikant ( $F(1, 54)=7,88$ ;  $p<0,05$ ;  $\eta_p^2 = 0,12$ ).



**Abbildung 5.44:** Die durchschnittliche Einstufung der Eingabemodalitäten bezüglich subjektiv wahrgenommener Arbeitslast. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (\*) gekennzeichnet.

Bei der Bewertung der Bedienmodalitäten unmittelbar nach den Fahrten unterscheiden sich die Eingabemodalitäten lediglich bezüglich den Kategorien „Präzision bei der Bedienung“ und wie einfach es den Probanden gelang die „Balance zwischen der Bearbeitung der Primär- und der Sekundäraufgabe zu halten“ (siehe Abbildung 5.45). Dabei gaben die Probanden an, dass sie die Nebenaufgabe effizienter lösen konnten, wenn diese mit dem MFL bedient wurde ( $Med=4,0$ ) als wenn die Interaktion mit dem Touchpad ( $Med=3,0$ ) erfolgte. Außerdem wurde die Balance zwischen der Überwachung der Fahraufgabe (primär) und der Bearbeitung der Sekundäraufgabe subjektiv besser bei der Bedienung mit dem MFL

(Med=4,0) als mit dem Touchpad (Med=3,0) gehalten. Paarweise Wilcoxon-Tests zeigten, dass dieser Unterschied in beiden Fällen signifikant ist ( $p < 0,05$ ).



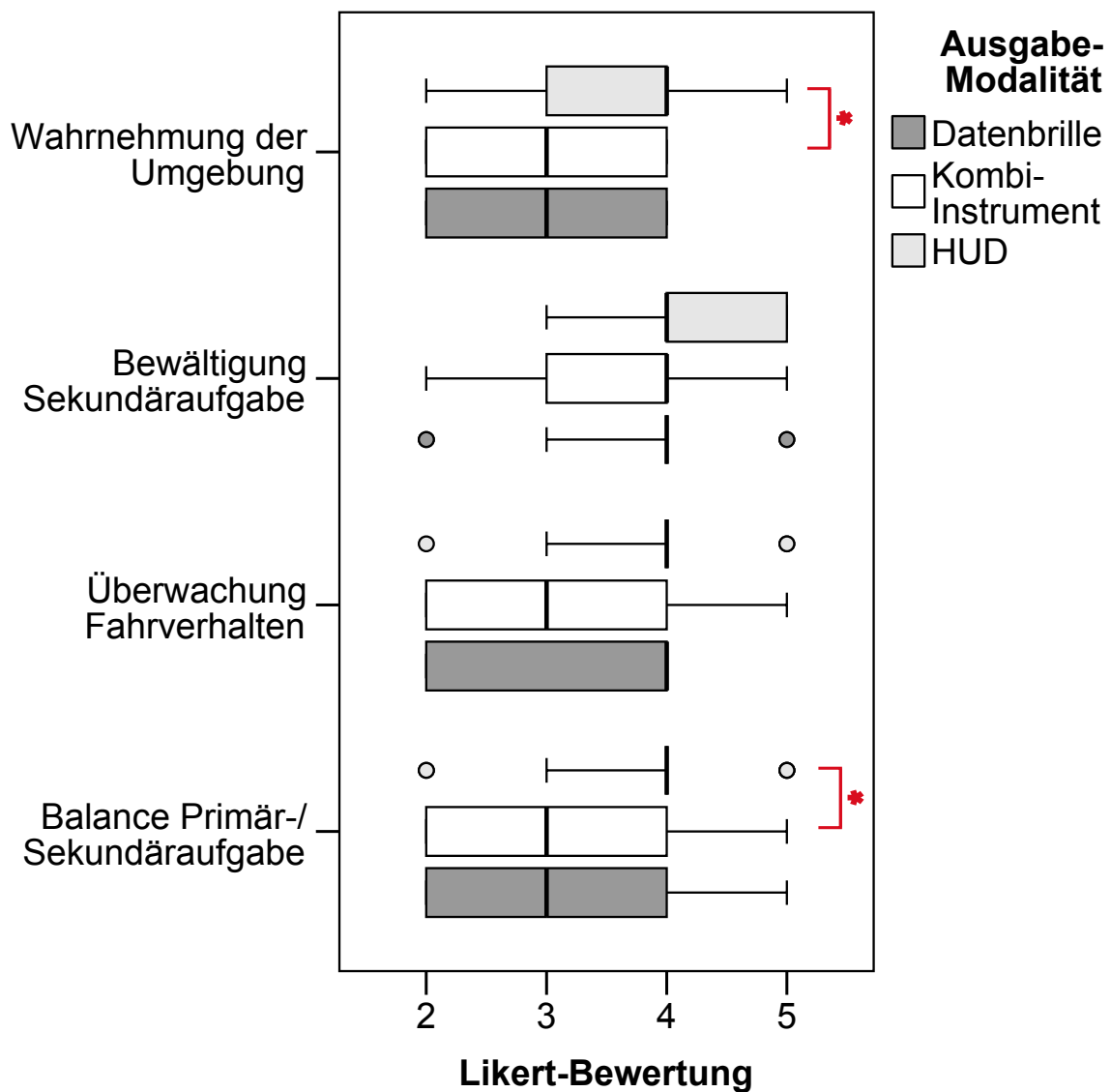
**Abbildung 5.45:** Die Bewertung der Probanden in den Fragebögen. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (\*) gekennzeichnet.

Abschließend wurde das während der Interaktion durchschnittlich aufgebraachte Lenkmoment analysiert. Dabei ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der Interaktion mit dem MFL ( $M=0,64$ ,  $SD=0,6$ ) und der Aufgabenbearbeitung über das Touchpad ( $M=0,62$ ,  $SD=0,5$ ).

**Ausgabemodalität** Die durchschnittliche Bedienzeit der Sekundäraufgabe unterschied sich bei Verwendung der Datenbrille ( $M=29,7$ ,  $SD=8,9$ ) nur geringfügig von den für das HUD ( $M=27,6$ ,  $SD=7,3$ ) und das Kombiinstrument ( $M=25,6$ ,  $SD=5,6$ ) gemessenen Zeiten. Auch wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen der mit der Datenbrille ( $M=11,9$ ,  $SD=12,0$ ) gemessene Fehleranzahl und der mit dem HUD ( $M=15,0$ ,  $SD=12,1$ ) und mit dem Kombiinstrument ( $M=11,5$ ,  $SD=10,0$ ) gemessenen festgestellt. Ebenso unterschied sich die subjektive Wahrnehmung der Arbeitsbelastung (NASA RTLX) bei der Verwendung der Datenbrille ( $M=34,7$ ,  $SD=13,5$ ) nicht zu der, die bei der Benutzung des HUD ( $M=31,6$ ,  $SD=12,4$ ) oder des Kombiinstrumentes ( $M=35,4$ ,  $SD=17,3$ ) gemessen wurde. Ein Einfluss der Ausgabemodalität auf die Bewertung im SUS-Fragebogen konnte ebenfalls

nicht nachgewiesen werden. Die höchsten Werte wurden bei diesem Fragebogen unter Verwendung des HUD ( $M=82,5$ ,  $SD=11,0$ ) gemessen, gefolgt von der Datenbrille ( $M=77,9$ ,  $SD=14,5$ ) und dem Kombiinstrument ( $M=75,5$ ,  $SD=17,6$ ).

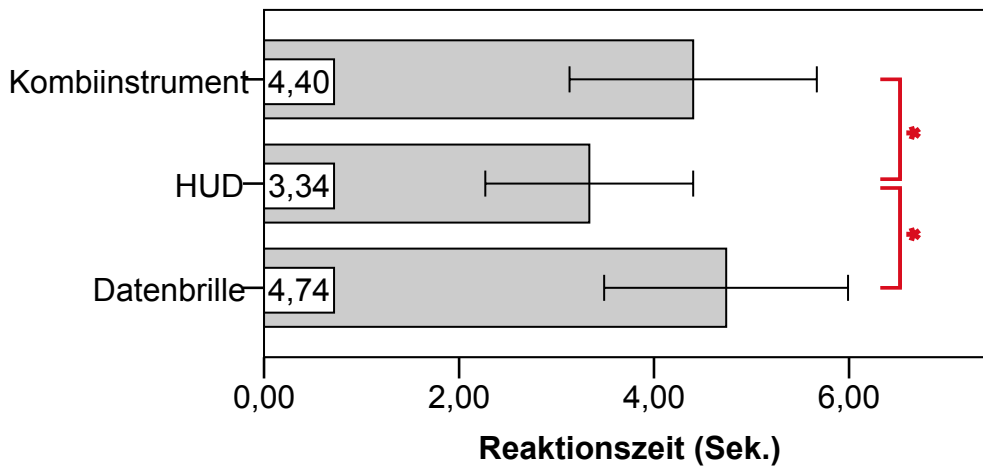
Lediglich bei der Auswertung des Abschlussfragebogens, in dem die Probanden aufgefordert wurden die erlebte Ausgabemodalität mittels fünfstufiger Likert-Skalen zu bewerten, traten bezüglich zwei Kriterien signifikante Unterschiede auf (siehe Abbildung 5.46). So hatten die Probanden das Gefühl ihre Umgebung bei der Verwendung des HUD besser im Blick zu haben als bei der Verwendung des Kombiinstrumentes ( $p<0,017$ ). Weiterhin hatten die Versuchspersonen das Gefühl, dass ihnen bei der Verwendung des HUD eine bessere Balance zwischen der Bewältigung der Primäraufgabe (Überwachung der Umwelt) und der Bearbeitung der Sekundäraufgabe gelang als bei Benutzung des Kombiinstrumentes ( $p<0,017$ ).



**Abbildung 5.46:** Die Bewertung der Probanden im Abschlussfragebogen. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (\*) gekennzeichnet.

### 5.4.5 Ergebnisse: Evaluation der Reaktionszeiten

Bei der Auswertung der Reaktionszeiten wurde nur mit 52 Probandendatensätzen gearbeitet, da ein Datensatz als Ausreißer von der Evaluation ausgeschlossen wurde (Reaktionszeit zwei Standardabweichungen über dem Mittelwert). Eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) zeigt, dass die Ausgabemodalität einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Reaktionszeiten hat ( $F(2, 50)=6,60$ ;  $p<0,05$ ;  $\eta_p^2 = 0,21$ ). Mittels paarweise durchgeführter t-Tests wurde festgestellt, dass die Reaktionszeit unter Verwendung der Datenbrille ( $M=4,74$  s,  $SD=1,3$ ) signifikant langsamer war als unter Verwendung des HUD ( $p<0,017$ ). Ebenso wurde bei der Verwendung des HUD ( $M=3,34$  s,  $SD=1,1$ ) signifikant schneller reagiert als bei der Anzeige im Kombiinstrument ( $M=4,40$  s,  $SD=1,3$ , siehe Abbildung 5.47).



**Abbildung 5.47:** Die Reaktionszeiten der Probanden unter Verwendung der verschiedenen Ausgabemodalitäten. Signifikante Unterschiede wurden mit einem (\*) gekennzeichnet.

Bei der Art der Reaktion wurde dabei zwischen einer Bremsung ( $Bremskraft > 0$ ) und einem Lenkmanöver ( $Lenkwinkel > 2^\circ$ ) unterschieden. Wenn die Fahrt mit dem HUD durchgeführt wurde, wurde in 47,4% der Fälle eine Bremsung durchgeführt, bei der Datenbrille in 41,2% der Situationen und beim Kombiinstrument in 33,3% der Fälle.

### 5.4.6 Diskussion

**Anzeige- und Bedienkonzept** Insgesamt scheint es den Versuchspersonen etwas leichter gefallen zu sein das Anzeigekonzept mit der gewohnten Interaktionsmodalität mittels Lenkradtasten und Knurl zu bedienen, als über das entwickelte Touchpad am Lenkrad. Besonders das Halten der Balance zwischen der instruierten Überwachung der Verkehrssituation und der Interaktion mit den Infotainment-Inhalten fiel den Probanden so subjektiv etwas leichter, als mit dem Touchpad. Der Grund hierfür liegt vermutlich in der, ebenfalls festgestellten, geringeren Präzision bei der Bedienung der listenbasierten Menüs. Gerade das Einrasten des drehbaren Knurls beim Wechsel von einem Listenelement zum nächsten ist ein hilfreiches Feedback, welches beispielsweise einem „Übersteuern“ entgegenwirken

kann. Dies scheint sich auch bei der subjektiv empfundenen Auslastung widerzuspiegeln. Diese wurde von den Probanden als signifikant höher empfunden wenn das System mit dem Touchpad bedient wurde. Bei den Leistungen in der Sekundäraufgabe wirkt sich dieser Vorteil jedoch nur bei der durchschnittlichen Bedienzeit aus, bei der eine signifikant schnellere Aufgabenbearbeitung mittels Lenkradtasten identifiziert wurde. Besonders in den Vorstudien wurde beobachtet, dass sich bei der Bedienung mit dem Touchpad ein deutlicher Lerneffekt einstellt. Überraschenderweise konnte hier bei der Texteingabe selbst für Nutzer, die in der Bedienung mit der neuen Eingabemodalität noch vollkommen ungeübt waren, keine Überlegenheit des etablierten iDrive-Controllers gegenüber des Touchpads festgestellt werden.

Insgesamt konnte die neue Bedienmodalität in den hier erprobten Anwendungsfällen jedoch ihre Vorteile nicht ausspielen. Für Anwendungsfälle, die sehr schlecht über Tasten und Knurl bedient werden können (Texteingabe, mehrdimensionale Auswahl), könnte ein zusätzliches Touchpad jedoch sinnvoll sein.

Der Intersubjektfaktor *Ausgabemodalität*, bei dem zwischen der Ausgabe auf einer Datenbrille, einem HUD und dem Kombiinstrument variiert wurde, hatte kaum Einfluss auf die Daten. Allerdings wurde der Effekt, dass sich bei der Benutzung einer überlagernden Anzeige die Umgebung subjektiv besser im Blick behalten lässt, zumindest für das HUD festgestellt. Aus diesem Grund fiel es den Versuchspersonen mit dem HUD vermutlich auch leichter, die richtige Balance zwischen Überwachungs- und Nebenaufgabe zu finden. In beiden Fällen konnte lediglich ein signifikanter Unterschied zur Benutzung des Kombiinstrumentes festgestellt werden.

Interaktionseffekte zwischen Ein- und Ausgabemodalität wurden erneut für keine der abhängigen Variablen festgestellt.

**Reaktionszeiten** Bei der Messung der Reaktionszeiten auf die unvorhergesehene Situation während der hochassistierten Fahrt wurden signifikant kürzere Reaktionszeiten für das HUD im Vergleich zu den beiden anderen Ausgabemodalitäten gemessen. Dieser Vorteil wird auf die verbesserte Fähigkeit, das Verkehrsgeschehen bei gleichzeitiger Interaktion mit einer Nebenaufgabe im Blick zu behalten, zurückgeführt. Erwartungsgemäß gelang dies besser, wenn die Interaktion mit halbtransparent überlagernden Anzeigen stattfand. Überraschend ist allerdings, dass die längsten Reaktionszeiten nicht wie erwartet für das Kombiinstrument gemessen wurden, sondern für die Datenbrille. Für dieses Ergebnis werden zwei Erklärungsmöglichkeiten in Betracht gezogen. Zum einen könnte die Tatsache, dass die Darstellungsqualität auf der Datenbrille noch nicht die auf dem HUD erreicht für diesen Unterschied verantwortlich sein. Eine schlechtere Ablesbarkeit könnte dann dazu führen, dass sich die Probanden stärker auf die Wahrnehmung der angezeigten Inhalte konzentrieren müssen, was sich wiederum negativ auf die Wahrnehmung im übrigen Blickfeld auswirkt. Ein weiterer Grund könnte die unterschiedliche Stabilisierung der Inhalte sein. Während das HUD über einen festen Anzeigeort knapp oberhalb der Motorhaube verfügt, bewegen sich die Anzeigen bei der Darstellung in der Datenbrille bei jeder Kopfbewegung mit. Auch dies könnte zu einer stärkeren Fokussierung auf die Inhalte bei gleichzeitig verringerter Wahrnehmung der Peripherie bewirkt haben. An dieser Stelle müssen weitere Studien für eine genaue Klärung der Gründe für dieses Ergebnis sorgen.

In einem Szenario, in dem die Fahraufgabe nicht mehr aktiv vom Fahrer übernommen werden muss, können bezüglich der Interaktion mit Anzeigen kaum Nachteile bei der Nutzung der Datenbrille festgestellt werden. Die gleichzeitige Überwachung des Verkehrsgeschehens, das zeigte die zweite Studie, gelang bei gleichzeitiger Interaktion mit kopfstabilen Inhalten in der Datenbrille nicht so gut wie mit fahrzeugstabilen Inhalten im HUD.

# Kapitel 6

---

## Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Nutzung der Datenbrille im Fahrzeug untersucht. Dabei wurden zunächst kurz die dabei verwendeten Techniken zur Entwicklung von Prototypen beschrieben. Mit *PapAR* wurde in diesem Zusammenhang eine *Paper Prototyping*-Technik vorgestellt, die durch die Verwendung einer zusätzlichen Lage aus Folie bestehende Probleme bei der Visualisierung früher Konzeptideen für die Datenbrille überwinden kann. In den beiden folgenden Kapiteln 4 und 5 wurden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepte beschrieben, evaluiert und die Ergebnisse der durchgeführten Grundlagenstudien zur Anzeige von Inhalten vorgestellt. Die Ergebnisse aus diesen beiden Kapiteln werden nun nochmals in Bezug auf die in Abschnitt 1.2 beschriebenen Forschungsfragen zusammengefasst und diskutiert. Anschließend werden erste Empfehlungen für die Verwendung von Datenbrillen im Fahrzeug ausgesprochen, die sich aus der zusammenfassenden Betrachtung aller Studienergebnisse aus dieser Arbeit ergeben. Zum Abschluss werden offene Forschungsfragen diskutiert, die im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden konnten und so Raum für weitere Arbeiten im Kontext der Datenbrillennutzung im Fahrzeug schaffen.

### 6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

#### 6.1.1 Anzeige von Inhalten

Im Kapitel 4 wurde drei Forschungsfragen nachgegangen, die sich auf die Anzeige von Information in einer Datenbrille beziehen.

**FF1: Welche Auswirkungen hat die kopfdrehungsunabhängige Anzeige von Information im primären Blickfeld des Fahrers und wo liegen die Unterschiede zu ortsfesten Anzeigen?**

Die kopfdrehungsunabhängige (kopfstabile) Anzeige von Information unterscheidet sich grundlegend von anderen, im Fahrzeug verfügbaren Anzeigen. Während bei den gewohn-

ten, fahrzeugstabilen Anzeigen der Blick explizit von der Fahrszene abgewandt werden muss, um die Inhalte ablesen zu können, befinden sich kopfstabile Inhalte immer im primären Blickfeld des Fahrers. Hier zeigte der erste Versuch (Abschnitt 4.1), dass dies sowohl Vor- als auch Nachteile mit sich bringt.

Auf der einen Seite gewährleistet die ständige Präsenz der Anzeigen, dass Information jederzeit für den Nutzer verfügbar ist und von diesem wahrgenommen werden kann. Gerade wenn Informationen möglichst schnell aufgenommen werden sollen, beispielsweise bei Warnungen, kann dies entsprechende zeitliche Vorteile mit sich bringen (Kapitel 4.3). Dieser Vorteil bei der Wahrnehmung von Information tritt jedoch nicht automatisch auf: In der entsprechenden Studie, bei dem der Fahrer gleichzeitig auf eine Anzeige im Fahrzeuginnenraum konzentriert war, konnten zunächst keine Vorteile gegenüber der fahrzeugstabilen Anzeige und damit der peripheren Wahrnehmung der Warnung festgestellt werden. Die Vermutung, dass dieser Effekt durch *inattentional blindness* hervorgerufen wurde, wurde durch die nachfolgende Untersuchung verstärkt. Wurde eine visuelle Referenz angezeigt, an dem sich die Probanden orientieren konnten auch wenn gerade keine Warnung angezeigt wurde, konnten sie schneller auf die Warnung reagieren als bei einer Anzeige auf dem HUD. Ein weiterer Vorteil kopfstabiler Anzeigen ist auch, dass für diese keine Positionserfassung (Tracking) des Kopfes notwendig ist. Hierdurch werden Inhalte generell ruhiger, angenehmer zu betrachten und weniger ablenkend empfunden als fahrzeugstabile Anzeigen auf der Datenbrille (Abschnitt 4.1).

Auf der anderen Seite können durch die ständige Präsenz der Inhalte im Blickfeld auch unangenehme Verdeckungseffekte entstehen (Abschnitt 4.1). So gibt es Fahrsituationen, in denen es notwendig ist eine entsprechende Kopfdrehung durchzuführen, um beispielsweise einen Blick in den Außenspiegel zu werfen oder auf kreuzenden Verkehr beim Befahren einer Vorfahrtsstraße zu achten. Auch bei einem Einparkvorgang werden Anzeigen wie die aktuelle Geschwindigkeit oder Navigationshinweise nicht benötigt. In diesen Situationen ist die freie Sicht auf die entsprechenden Objekte in der Umgebung zu gewährleisten und kopfstabile Anzeigen werden daher schnell zum Störfaktor.

**FF2: Wo liegen die verbleibenden technologischen und konzeptionellen Herausforderungen beim Einsatz von Datenbrillen im Fahrzeug und wie können diese bewältigt werden?**

Die angesprochenen Probleme kopfstabiler Anzeigen sind jedoch nicht technischer Natur. Bereits mit heute verfügbarer Datenbrillentechnologie können diese in ausreichend guter Qualität dargestellt werden. Im Gegensatz dazu treten bei der Verwendung fahrzeugstabiler Anzeigen auf der Datenbrille überwiegend Probleme auf, die technologischen Ursprungs sind (siehe Abschnitt 4.1). Grundsätzlich könnte durch den flexiblen Anzeigebereich der Datenbrille jeder Ort in der Umgebung des Fahrzeugs mit virtuellen Inhalten überlagert werden, wodurch die geringe Flexibilität des HUD überwunden werden könnte. In der Praxis gibt es allerdings zwei große Nachteile bei dieser Form der Anzeige:

Zunächst verfügen heutige Datenbrillen aus technischen Gründen über einen relativ kleinen Anzeigebereich. Dieser deckt aktuell einen Sichtwinkel von knapp 35° horizontal und knapp 20° vertikal ab. Der Sichtwinkel des Menschen ist mit fast 200° horizontal und etwa 100° vertikal allerdings sehr viel größer als dieser Bereich. Hierdurch kann der Effekt



entstehen, dass ein von virtuellen Inhalten überlagertes Objekt sich zwar noch im Sichtfeld des Nutzers befindet, jedoch nicht mehr im Anzeigebereich der Datenbrille. Im Extremfall werden die zu dem Objekt gehörigen Inhalte dann überhaupt nicht mehr angezeigt. Sehr viel häufiger tritt jedoch der Effekt auf, dass die Inhalte bei Kopfbewegungen an den Rändern des Anzeigebereichs „abgeschnitten“ werden, sich also nur noch teilweise innerhalb des Anzeigebereichs befinden.

Weiterhin ist für alle Inhalte, die in einem anderen Koordinatensystem als dem des Benutzers positioniert sind, ein Head-Tracking des Kopfes notwendig. Aufgrund der Gegebenheiten im Fahrzeug (keine kontrollierte Akustik, Magnetfelder) kommt prinzipiell nur der Einsatz optischer Trackingverfahren in Betracht. Diese sind jedoch im Vergleich immer noch relativ langsam und unpräzise. Davon abhängige Anzeigen werden entsprechend unruhig empfunden und der zeitliche Versatz, der zwischen Kopfbewegung und Reaktion der Anzeige entsteht, stört die Illusion einer fest im Fahrzeug verorteten Anzeige.

Diese Probleme können jedoch nicht nur durch technologische Verbesserungen gelöst werden, sondern auch mit einem Anzeigekonzept (siehe Kapitel 4.4). Hierzu wurden Konzeptvarianten entwickelt, bei denen die Kopfbewegung des Nutzers nicht mehr linear mit der Position der Anzeigen auf der Datenbrille verrechnet werden. Stattdessen werden andere Abbildungsfunktionen zugrunde gelegt oder die Abbildung erfolgt nicht mehr auf die Position der Inhalte sondern auf andere Anzeigeparameter. Hierdurch wurde ein vollkommen neuer Design Space für Anzeigen auf der Datenbrille eröffnet. Die resultierenden Anzeigekonzepte sind weder kopfstabil noch fahrzeugstabil, die Kopfbewegung wird vielmehr als ein Indikator für Situationen verwendet, in denen eine Veränderung der Anzeigeposition oder -gestalt erwünscht ist. Drei unterschiedliche Ausprägungen dieses Prinzips wurden insgesamt umgesetzt und miteinander verglichen. Die dabei am besten bewertete Konzeptausprägung bildet eine Kopfrotation nicht, wie bei fahrzeugstabilen Anzeigen üblich, auf die Anzeigeposition der Inhalte ab sondern auf deren Transparenz. Je weiter die Kopfdrehung des Fahrers von einem vorher festgelegten Sichtbereich abweicht, desto transparenter wird die Anzeige bis sie schließlich nicht mehr zu sehen ist. Diese Konzeptvariante wurde anschließend mit dem Stand der Technik, also kopfstabilen sowie fahrzeugstabilen Anzeigen, verglichen. Im Ergebnis wurden dem neuen Konzept *Alphablending HUD* die gleichen Vorteile bescheinigt wie einer kopfstabilen Anzeige (Ruhe, Ablesbarkeit), ohne jedoch deren Nachteile (Verdeckungen, Präsenz in jeder Situation) in Kauf nehmen zu müssen. Somit wurde auch eine Möglichkeit gefunden die eingangs (siehe unter FF1) genannten negativen Effekte kopfstabiler Anzeigen zu verringern.

**FF3: Welche Anzeigeparameter sollten bezüglich Anzeigeort, -Größe und -Menge gewählt werden?**

Unabhängig von der Wahl des Referenzkoordinatensystems ist es besonders im Fahrzeug wichtig die Anzeige von Information auf der Datenbrille so zu gestalten, dass sie möglichst wenig mit der Fahraufgabe interferiert. Daher wurden insgesamt drei Studien durchgeführt um erste Anhaltspunkte für die optimale Wahl des Anzeigenortes und der Anzeigengröße, sowie der maximalen Anzeigenmenge zu gewinnen (Abschnitt 4.2). Alle Inhalte wurden dabei kopfstabil angezeigt, um die Präsenz von Inhalten im Blickfeld optimal kontrollieren zu können und für alle Versuchsteilnehmer identisch zu gestalten. Die erste Studie zielte darauf ab, die optimale Anzeigeposition zu finden und die hierfür ausschlaggebenden

Kriterien zu identifizieren. Die Studie fand in einem stehenden Realfahrzeug statt. Die Probanden wurden instruiert die Fahraufgabe lediglich gedanklich durchzuführen und sich in verschiedene instruierte Verkehrssituationen hineinzusetzen. Als Haupt-Kriterium für die optimale Positionierung der Inhalte wurde in dieser Studie die Vermeidung von Verdeckungseffekten mit Objekten der Umgebung des Fahrers identifiziert. Die Idealposition lag für die Mehrzahl der Probanden daher am linken, oberen Rand des Anzeigebereichs der Datenbrille. Bei der Verifikation dieser Ergebnisse in einer Fahrsimulation stellte sich heraus, dass bei der tatsächlichen Durchführung der Fahraufgabe die Amplitude der Blickabwendung vom Zentrum der Datenbrille erheblich wichtiger wird. Da bei der Benutzung der Datenbrille diese Blickabwendungen ausschließlich durch Pupillenbewegungen durchgeführt werden müssen, lag die Idealposition der meisten Probanden nun tendenziell etwas näher am Zentrum und in der unteren Hälfte des Anzeigebereichs. Dabei liegen die meisten Positionen jedoch immer noch außerhalb des von Peli empfohlenen  $10^\circ$ -Sichtkegels [120]. Dies liegt vermutlich zum einen an der visuell anspruchsvollen Fahraufgabe, bei der die Probanden ein extremes Bedürfnis einer freien Sicht auf die Fahrszene haben. Zum anderen gilt die angesprochene Empfehlung für monokulare Datenbrillen und kann wohl nicht unverändert auf die Nutzung bi-okularer Systeme übertragen werden. Dennoch deuten die Ergebnisse darauf hin, dass bei der gleichzeitigen Durchführung der Fahraufgabe die Inhalte nicht zu weit außerhalb des zentralen Anzeigebereichs platziert werden sollten, um einen angenehmen Fokuswechsel zwischen Anzeigen in der Datenbrille und der Fahrszene zu ermöglichen.

Neben der Anzeigenposition war ein weiteres Ziel der zweiten Studie, den Anteil des Anzeigebereichs zu ermitteln, der von den Anzeigen maximal bedeckt werden kann, bevor mit Beeinträchtigungen der Fahraufgabe zu rechnen ist. Dieser Bereich lag nach dem Empfinden der Probanden für die weniger anspruchsvolle Autobahnfahrt zwischen fünf und sieben Grad ( $M=5,6^\circ$ ,  $SD=1,1^\circ$ ), für die visuell komplexere Stadtfahrt zwischen vier und sechs Grad ( $M=5,0^\circ$ ,  $SD=0,8^\circ$ ) in x- und y-Richtung. Die hier ermittelten Zahlen gelten jedoch für einen rechteckigen und relativ zusammenhängenden Anzeigebereich. Eventuell würde durch eine optimale Verteilung der einzelnen Anzeigeelemente auf den gesamten Anzeigebereich würde eine (in Summe) höhere Abdeckung toleriert.

In einer dritten Studie in der Fahrsimulation wurde der Frage nachgegangen, wie viele Elemente gleichzeitig auf der Datenbrille angezeigt werden können, ohne dass sich dies messbar auf die Fahrleistung, die Leistungen in einer Sekundäraufgabe und die subjektiv empfundene Ablenkung der Probanden auswirkt. In einer Studie konnten Versuchspersonen dabei die gewählte Suchaufgabe auf beiden Anzeigemodalitäten bis zu der maximal getesteten Gesamtzahl von sieben Elementen ohne signifikanten Leistungsverlust in der Primäraufgabe bearbeiten. Allerdings geschah dies auf Kosten der Leistungen in der Sekundäraufgabe, die mit höherer Anzahl angezeigter Elemente auch immer weniger schnell bearbeitet werden konnte. Dieser „Schutz“ der Primäraufgabe ist aus der Literatur bekannt [63]: Mit steigender Aufgabenkomplexität sinkt oft nur die Leistung in der Sekundäraufgabe während die Fahraufgabe unverändert gut durchgeführt werden kann. Die subjektiven Aussagen der Probanden deuten jedoch darauf hin, dass nicht mehr als fünf Elemente gleichzeitig angezeigt werden sollten. Die Tatsache, dass sowohl bei den Leistungen in der Sekundäraufgabe als auch bezüglich der subjektiven Probandeneinschätzungen das HUD der Datenbrille signifikant überlegen war, hängt sicherlich auch mit der technischen Qualität der verfügbaren Datenbrille zusammen. Auf Basis dieser Studie kann hierüber jedoch

keine eindeutige Aussage getroffen werden: ein Zusammenhang mit der Stabilisierung von Inhalten wäre ebenso denkbar, konnte jedoch hier nicht technologieunabhängig beantwortet werden.

## 6.1.2 Interaktion mit Inhalten

Im Kapitel 5 wurden Konzepte zur Interaktion mit Inhalten auf der Datenbrille erarbeitet, prototypisch umgesetzt und evaluiert. Ein Forschungsbeitrag sind dabei die entwickelten Konzepte selbst. Außerdem werden Anzeigereferenz und Eingabemodalität variiert, um so die möglichen Auswirkungen auf die Fahr- und Sekundäraufgabe zu untersuchen.

**FF4: Durch welche Anzeigekonzepte können die Vorteile einer Datenbrille effektiv für den Einsatz im Fahrzeug genutzt werden und welche Auswirkungen haben die Anzeigereferenz und die Eingabemodalität bei der Interaktion mit Sekundäraufgaben?**

In Abschnitt 5.1 wurde das Potenzial einer Bedienung der Inhalte in der Datenbrille durch **Blickgesten** näher betrachtet. Anhand von Anwendungsfällen unterschiedlicher Komplexität wurde hier insbesondere die Nutzung unterschiedlicher Augenpositionen sowie das Ablenkungspotenzial dieser Interaktionsmodalität im Fahrzeug untersucht. Vermutlich konnten auch aufgrund der relativ kleinen Stichprobengröße bei keinem der Anwendungsfälle negative Effekte auf die Fahrleistung identifiziert werden. Die subjektiven Bewertungen der Probanden lassen jedoch vermuten, dass Augengesten – zumindest mit dem verwendeten Prototyp – für die Bedienung von Inhalten in der Datenbrille während der Fahrt nicht geeignet sind. Die Probanden unterschieden dabei zwar zwischen sehr einfachen Interaktionsabläufen (wie der Annahme eines Anrufs) und der Bedienung von komplexen Menüstrukturen. Gleichzeitig stellten sie jedoch eine relativ hohe (besonders physische) Auslastung fest und kritisierten die unzureichende Systemkontrolle und das mangelnde Feedback. Außerdem bevorzugte eine große Mehrheit der Probanden die Verwendung von Sekundärpositionen für die Durchführung von Augengesten. Im Gegensatz zu den Tertiärpositionen muss das Auge hierbei lediglich um eine statt um zwei Achsen gedreht werden, was sich offensichtlich deutlich auf den Bedienkomfort bei der Interaktion auswirkte. Einige der Anwendungsfälle nutzten sehr eingängige Metaphern zur Systembedienung, beispielsweise die Augenbewegung nach rechts oben für die Aktivierung der Rückspiegel-Visualisierung. Allerdings würde, gerade bei sehr einfachen Anwendungsfällen, auch ein einziger Tastendruck für deren Bedienung ausreichen. Bei der Vielzahl von für die Nutzung während der Fahrt optimierten Bedienelementen im Fahrzeug ist dies vermutlich in jedem Fall vorzuziehen.

In Abschnitt 5.2 wurde die Interaktion und die Anzeige der Inhalte während der Bedienung eines **Touchscreens** entkoppelt. Während die Bedienung nach wie vor auf dem Touchscreen selbst stattfindet, werden die Inhalte sowie das visuelle Feedback der Interaktion auf einem HUD beziehungsweise einer Datenbrille angezeigt. Damit wurde bewusst ein Bruch herbeigeführt, gilt die direkte Bedienung der Inhalte doch als einer der Haupt-Vorteile bei der Interaktion mit einem Touchscreen. Begründet wurde dieser Schritt damit, dass durch

diese Trennung von Anzeige- und Bedienort das oft kritisierte Blickverhalten bei der Interaktion mit einem Touchscreen während der Fahrt verbessert werden könnte. Die Ergebnisse der Studien zeigten Vor- und Nachteile der kontaktlosen und -basierten Gesteninteraktion mit Inhalten auf der Datenbrille auf. Gerade die Verwendung von präemptiven Handgesten zur Ableitung eines Interaktionswunsches haben für die Gewährleistung von unterbrechbaren Anwendungen auf der Datenbrille großes Potenzial. Für diese ist jedoch aus ergonomischen Gründen möglicherweise eine Verlagerung der Interaktionsebene auf den horizontalen Teil der Mittelkonsole vorzuziehen. Eine vertikale Positionierung des Touchscreens, das machte die entsprechende Studie deutlich, kann bei der Annäherung der Hand eine unbewusste Verschiebung der Handposition nach unten zur Folge haben.

In Abschnitt 5.3 wurde ein Infotainment-Konzept vorgestellt, welches auf die optimale Nutzung der Vorteile der Datenbrille abzielte. Neben der Verwendung eines **Dreh-Drückstellers** wurde hier abermals die Interaktion mittels **Handgesten** untersucht. Letztere wurden nun jedoch weiter vereinfacht und beschränken sich auf horizontale Zeigebewegungen, während Bewegungen in Richtung der Mittelkonsole oder in vertikaler Richtung vom System ignoriert wurden. Durch diese Vereinfachung des Interaktionskonzepts konnte eine leistungsfähige Bedienung des Systems mittels Gesten realisiert werden. Bei Nutzung des Dreh-Drückstellers konnten nun keine messbaren Vorteile bezüglich der Leistungen in der Sekundäraufgabe mehr festgestellt werden. Dennoch harmonisierte dieser subjektiv besser mit der Fahraufgabe. Die gleichzeitig bei der Interaktion mit Gesten festgestellte, signifikante Verschlechterung der Spurhaltung ist möglicherweise auf ungewollte, assoziierte Bewegungen mit der lenkenden Hand zurückzuführen. Neben der Interaktionsmodalität wurde in dieser Studie auch der Einfluss verschiedener Stabilisierungsarten auf die Leistungen in der Primär- und Sekundäraufgabe untersucht. Sowohl bezüglich der Leistungen in der Nebenaufgabe als auch der subjektiv empfundenen Auslastung und Systembenutzbarkeit war hierbei das HUD der Datenbrille meist überlegen. Auf der Datenbrille erzielte die kopfstabile Anzeige hier bessere Werte als die fahrzeugstabile Darstellung. Eine Verschlechterung der Fahrleistungen bei der Nutzung der Datenbrille im Vergleich zum technisch ausgereiften HUD konnte nicht festgestellt werden. Es bleibt offen, ob die messbaren Unterschiede einzig auf technische Rahmenbedingungen zurückzuführen sind. Bei dem Vergleich zwischen fahrzeugstabilen Inhalten und dem HUD ist dies vermutlich der Fall: Größe, Position und Darteilungsentfernung waren in beiden Bedingungen identisch. Die kopfstabile Anzeige auf der Datenbrille ist jedoch technisch sehr gut realisierbar und aus diesem Gesichtspunkt durchaus vergleichbar mit der Anzeige auf dem verwendeten HUD-Aufbau. Daher liegt die Vermutung nahe, dass sich die fahrzeugstabile Anzeige etwas besser für die Anzeige interaktiver Inhalte im Fahrzeug eignet.

In Abschnitt 5.4 wurde die Nutzung der Datenbrille während einer Fahrsituation untersucht, in der das Fahrzeug sowohl die Längs- als auch die Querführungsaufgabe automatisiert vornehmen kann. In dieser Situation hat der Fahrer immer noch die Aufgabe die Arbeit des Assistenzsystems zu überwachen und bei Bedarf einzugreifen. Allerdings verfügt er über zusätzliche Kapazitäten, was die Verwendung von Unterhaltungs- und Kommunikationsanwendungen ermöglicht. Als Interaktionsort wurde hier das Lenkrad gewählt, um einen eventuell notwendigen, raschen Eingriff in die Fahraufgabe zu ermöglichen. Ein Vergleich zwischen der Interaktion mittels indirekter **Touch-Gesten** und der Verwendung von **Bedienelementen** (Tasten und Knurl) am Lenkrad bestätigte erneut die Wichtigkeit haptischen Feedbacks. Gerade das Drehen des Knurls mit fest definierten, fühlbaren Ein-

rastpunkten ermöglichte eine schnellere und subjektiv weniger beanspruchende Bedienung der listenbasierten Menüstrukturen. Diese fahrfremde Aufgabe wurde entweder auf dem HUD, auf dem Kombiinstrument oder als kopfstabile Anzeige auf der Datenbrille dargestellt. Ein signifikanter Einfluss der Ausgabemodalität konnte dabei weder auf die Bearbeitung der Sekundäraufgabe noch auf die wahrgenommene Auslastung oder die Systembenutzbarkeit festgestellt werden. Allerdings konnte nach dem Empfinden der Probanden die Balance zwischen Überwachungs- und Nebenaufgabe mit dem HUD besser als mit den beiden anderen Anzeigetechnologien gehalten werden. Dies wurde durch eine verbesserte Wahrnehmung der Umgebung während der Interaktion ermöglicht.

Dieser, zunächst lediglich subjektive, Eindruck der Probanden wurde in einer weiteren Studie im Fahrsimulator bestätigt. So konnten die Probanden signifikant schneller auf eine kritische Situation reagieren und die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen wenn die Nebenaufgabe im HUD angezeigt wurde, als wenn die Darstellung in der Datenbrille (kopfstabil) oder auf dem Kombiinstrument stattfand. Während die Vorteile des HUD im Vergleich zum Kombiinstrument erwartet wurden, bleibt unklar, warum die kopfstabile Anzeige in der Datenbrille sich nicht ähnlich vorteilhaft auf die periphere Wahrnehmung der Umgebung auswirkt. Möglich ist, dass die schlechtere Anzeigequalität in der Datenbrille eine höhere Anstrengung beim Ablesen der Information und somit eine verminderte periphere Wahrnehmung zur Folge hat. Ein weiterer Erklärungsversuch ist, dass die kopfstabile Informationsdarstellung, die bei Bewegungen des Kopfes ständig vor einem unterschiedlichen Hintergrund stattfindet, sich erschwerend bei der Informationswahrnehmung auswirkt und somit eine intensivere Fokussierung fördert.

## 6.2 Schlussfolgerungen

Aufgrund der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Abschnitt erste Empfehlungen für die Entwicklung von Anzeige- und Interaktionskonzepten für die Datenbrille im Fahrzeug formuliert. Dabei kann diese Dissertation jedoch lediglich einen ersten Beitrag zu diesem Forschungsgebiet leisten. Für eine fundierte, abschließende Beurteilung, ob und unter welchen Voraussetzungen die Datenbrillen im Fahrzeug genutzt werden können, wird daher empfohlen weitere Studien durchzuführen, um vorhandene Ergebnisse zu bestätigen und ungeklärte Fragen zu beantworten.

### 6.2.1 Anzeigeposition und Anzeigereferenz

Die Datenbrille bietet mehr Flexibilität bei der Darstellung von Information als andere, im Fahrzeug bereits eingesetzte Anzeigetechnologien. Durch die freie Wahl eines Referenzsystems zur Positionierung der Inhalte kann theoretisch die gesamte Umgebung des Fahrers zur Informationsanzeige genutzt werden. Das Sichtfeld des Fahrers sollte jedoch dabei nur gezielt mit Information angereichert werden. So sollte der (zusammenhängende) Bereich, der auf einer Datenbrille für die Anzeige von Inhalten genutzt werden kann, kleiner als  $6^\circ$  sein. Bei der Positionierung von Inhalten muss ein Kompromiss gefunden werden. Einerseits sollten zu große Blickabwendungen vermieden werden, andererseits

wird auch eine zu zentrale Darstellung als unangenehm empfunden. Für kopfstabile Anzeigen hat sich hier eine Position links, knapp außerhalb eines  $10^\circ$  Sichtkegels bewährt. Auch der Hintergrund, der von den Inhalten in der Datenbrille überlagert wird, ist entscheidend für die optimale Anzeigeposition. Ein ruhigerer, kontrastärmerer Hintergrund eignet sich besser als eine Szene, die sich durch einen hohen Kontrastumfang auszeichnet. Für fahrzeugstabile Anzeigen scheint daher die Position des heutigen HUD knapp oberhalb der Motorhaube diesen Kompromiss am besten aufzulösen: die Blickabwendung ist relativ gering, der Hintergrund (Asphalt) sehr homogen und die Verdeckung anderer Verkehrsteilnehmer unwahrscheinlich. Für kopfstabile Anzeigen ist die Positionierung der Anzeigen in Relation zum Hintergrund generell nicht zu kontrollieren.

Ein weiterer, wichtiger Aspekt dieser Dissertation war der Vergleich der Anzeigereferenzen kopfstabil und fahrzeugstabil. Dabei wurde festgestellt, dass mit aktueller HMD- und Tracking-Technologie noch nicht die Darstellungsqualität fahrzeugstabiler Anzeigen erreicht werden kann, die beispielsweise auf einem HUD möglich ist. Im direkten Vergleich mit dem HUD sank bei Nutzung der Datenbrille die Leistung in der Fahr- und/oder Sekundäraufgabe teilweise signifikant. Hierfür sind besonders der nicht ausreichend dimensionierten Anzeigebereich der Datenbrille und die immer noch zu großen Latenz optischer Tracking-Verfahren verantwortlich.

Ein technologieunabhängiger Vergleich kopf- und fahrzeugstabiler Anzeigen ist aus diesem Grund aktuell unmöglich. Um die konzeptionellen Unterschiede (und deren Folgen) zwischen diesen beiden Darstellungsvarianten trotzdem zu identifizieren, kann allerdings der Vergleich zwischen kopfstabiler Anzeige auf der Datenbrille und fahrzeugstabiler Anzeige auf dem HUD erste Anhaltspunkte liefern. Dabei wird deutlich, dass für die meisten Anwendungsfälle vermutlich die fahrzeugstabile Anzeige zu bevorzugen ist. Nur sie kann genau so positioniert werden, dass Verdeckungen anderer Elemente in der Umgebung des Fahrers ausgeschlossen werden können. Allerdings kann sich in anderen Fällen die kopfstabile Anzeige von Information durchaus positiv auswirken. Soll der Fahrer schnell und unabhängig von seiner aktuellen Blickrichtung über ein kritisches Ereignis informiert werden, können sich die Reaktionszeiten hier signifikant verkürzen.

## 6.2.2 Adaptivität und Unterbrechbarkeit

Die angesprochenen technologischen Grenzen für die Nutzung einer Datenbrille sind allerdings nicht unüberwindbar. Der offensichtliche Weg hier Verbesserungen herbeizuführen, liegt in der Weiterentwicklung der jeweiligen Technologiefelder. Daneben wurde in dieser Dissertation jedoch auch ein vollkommen neuer Weg vorgestellt, der die Probleme nur durch die Verwendung einer neuen Anzeigetechnik abschwächt. Hierbei wird das Konzept der Anzeigereferenz aufgelöst und die Kopfdrehung zur Anpassung der Anzeigentransparenz genutzt. Hier könnte der Schlüssel zur effektiven Nutzung der Datenbrille mit bereits heute verfügbaren Mitteln liegen. Werden die Anzeigen optimal auf die jeweilige Situation des Fahrers abgestimmt, können einige Vorteile der Datenbrille heute bereits genutzt werden ohne nachteilige Konsequenzen in Kauf nehmen zu müssen. Mit der aktuellen Blickbeziehungsweise Kopfdrehungsrichtung nutzte das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept lediglich einen Hinweis auf die aktuelle Situation des Fahrers. Die in der Probandenstudie festgestellten, deutlichen Verbesserungen gegenüber etablierten Anzeigemechanismen

deuten jedoch auf die Wirksamkeit dieses Vorgehens hin. Mit einer Hinzunahme weiterer Daten, die auf den aktuellen Kontext des Fahrers hinweisen, ist eine weitere Verbesserung der Situation wahrscheinlich.

Ein weiteres Beispiel hierfür wurde in dieser Arbeit im Zusammenhang mit der Anzeige von interaktiven Inhalten gegeben. Während fahrrelevante Anzeigen, wie die aktuelle Geschwindigkeit oder Navigationshinweise, durchaus ständig zugänglich sein können, sollten beispielsweise komplexere Menüs nur angezeigt werden, wenn der Fahrer auch mit ihnen interagieren will. In dieser Arbeit wurden hierzu präemptive Handgesten verwendet. Die Feststellung der An- und Abwesenheit der Hand in einem vorher definierten Bereich, beispielsweise in der Nähe des verwendeten Bedienelements, ist robust und ermöglicht die unterbrechbare und intuitive Nutzung der Anzeigen. Will der Fahrer eine Information abrufen oder eine Eingabe tätigen, ist das System in der Lage dies zu erkennen und blendet die entsprechenden Inhalte ein. Ist er dagegen mit der Fahraufgabe beschäftigt, können die entsprechenden Anzeigen verborgen werden und stören den Fahrer nicht bei der Durchführung der Primäraufgabe.

Der adaptiven und situationsgerechten Anzeige von Information wird auch in anderen Anwendungsgebieten eine große Bedeutung beigemessen. Bei der Nutzung von Datenbrillen im Fahrzeug gibt es jedoch zwei Besonderheiten. Zum einen verfügen moderne Fahrzeuge über immer mehr Sensorik, die eine präzise Erfassung des jeweiligen Nutzungskontextes ermöglichen. Zum anderen sind die Anforderungen an die Mensch-Maschine Schnittstelle einer Datenbrille in diesem Bereich besonders hoch. Einerseits können hier herausfordernde Verkehrssituationen auftreten, in denen eine visuelle Überlastung des Fahrers durch die zusätzliche Informationsanzeige in dessen Blickfeld unbedingt vermieden werden muss. Andererseits gibt es jedoch auch Situationen, in denen der Fahrer noch über zusätzliche Ressourcen verfügt und diese möglicherweise nutzen möchte, um sein Informations-, Kommunikations- und Unterhaltungsbedürfnis zu stillen. Diese wechselnden Nutzerbedürfnisse können durch die Nutzung kontextsensitiver Anzeige- und Bedienkonzepte auch bei der Verwendung einer Datenbrille zufrieden gestellt werden.

### 6.2.3 Mehrwert und Ablenkungspotenzial

Der Mehrwert der Datenbrille gegenüber eines sogenannten Head-Down Displays, also beispielsweise dem Kombiinstrument oder dem CID, ergibt sich durch die theoretische Möglichkeit der Nachbildung eines HUD automatisch. Sobald diese in ausreichender Qualität möglich ist, ergeben sich bei der Nutzung einer Datenbrille eine Vielzahl zusätzlicher Vorteile und Anwendungsmöglichkeiten.

Bis dieser Zeitpunkt erreicht ist, sollte jedoch auf ein HUD nicht verzichtet werden. Die ruhige und ablenkungsarme Darstellung an dieser Position ist allen Darstellungsvarianten auf der Datenbrille vermutlich nach wie vor überlegen. Da einige Anwendungsfälle jedoch mit einem HUD nicht dargestellt werden können, stellt sich jedoch auch die Frage nach einer komplementären Nutzung. Kopfstabile Anzeigen beispielsweise können ausschließlich auf einer Datenbrille dargestellt werden und ermöglichen, das wurde in dieser Arbeit gezeigt, unter Umständen eine raschere Informationsaufnahme durch den Fahrer. Kopfstabile Anzeigen können aber auch, zumindest in ihrer heutigen technischen Umsetzung, die

Aufmerksamkeit des Fahrers sehr stark bündeln. Bis die genauen Gründe hierfür geklärt sind sollten gerade interaktive Konzepte auf kopfstabilen Anzeigen besonders intensiv auf eventuell auftretende Effekte von *Cognitive Capture* untersucht werden. Letztlich sollte bei jedem Anwendungsfall der potenzielle Nutzen und die damit verbundenen Risiken von neuem bewertet und so der Zeitpunkt einer ausschließlichen oder zusätzlichen Nutzung der Datenbrille im Fahrzeug entschieden werden.

Wenig relevant für die Ablenkung von der Fahraufgabe ist scheinbar die bloße Menge der Anzeigen. Wie auch beim HUD [37] treten hier, zumindest bis zu einer Zahl von sieben gleichzeitig angezeigten Elementen, keine messbaren Effekte auf die Fahrleistung auf. Hier ist, genau wie bei anderen Anzeigen im Fahrzeug, die Kombination aus Komplexität der Sekundäraufgabe, des Interaktionsablaufes und den Anforderungen der simultan zu bewältigenden Fahrsituation entscheidender. Die Tatsache, dass eine entsprechende Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit ergab, dass nicht mehr als fünf Elemente gleichzeitig angezeigt werden sollten, steht vermutlich mit einer maximal tolerierten Sichtverdeckung in Zusammenhang. Hierfür ist wiederum auch die Darstellungsgröße *eines* angezeigten Elements entscheidend.

## 6.2.4 Indirekte Interaktion mit Inhalten auf der Datenbrille

Neben der Interaktion mittels Sprache kommen zur Bedienung von Inhalten auf der Datenbrille weitere Modalitäten in Frage, die eine indirekte Interaktion ermöglichen. In dieser Arbeit wurden die im Fahrzeug erprobten Bedienelemente am Multifunktionslenkrad sowie der Dreh-Drücksteller an konkreten Konzepten erprobt. Diesen wurde die Interaktion mittels indirekter Hand-, Blick- und Touchgesten gegenübergestellt. Dabei wirkte sich die Verwendung der haptischen Bedienelemente im direkten Vergleich stets positiv auf die Durchführung von Fahr- und Nebenaufgabe aus und wird daher auch für die Bedienung der Datenbrille im Fahrzeug empfohlen. Allerdings ergaben die Untersuchungen auch für die anderen Eingabemodalitäten interessante Ergebnisse, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

Die Eingabe mittels **Blickgesten** erschien dabei zunächst sehr attraktiv, da entsprechende Sensoren gut in die Datenbrille integriert werden können und eine unaufwändige Eingabe ohne die Nutzung der Hände ermöglicht werden könnte. Die eher kontraproduktive Blickabwendung zur Befehlseingabe konnte dabei nicht durch eine entsprechende Vereinfachung der benötigten Blickgesten kompensiert werden. Besonders für die Verwendung im Fahrzeug erscheint die Verwendung einer anderen Modalität daher in jedem Anwendungsfall sinnvoller.

**Indirekte Handgesten** vermitteln bei der Interaktion keinerlei haptische Rückmeldung. Dadurch wird die Bedienung weniger präzise als beispielsweise bei der Verwendung mechanischer Eingabegeräte, was wiederum zu erhöhter subjektiver Auslastung und geringeren Bedienleistungen führen kann. Eine Reduktion deren Komplexität kann hier Abhilfe schaffen, beispielsweise durch die Beschränkung auf eine einzige Interaktionsachse. Bei einer entsprechenden Umsetzung konnten keine signifikanten Vorteile des etablierten Dreh-Drückstellers auf die Bedienleistungen in der Sekundäraufgabe festgestellt werden. Die gleichzeitig gemessene, möglicherweise durch assoziierte Bewegungen der lenkenden



Hand ausgelöste, signifikante Verschlechterung der Spurhaltegröße stellt jedoch die Interaktion mittels Handgesten im Fahrzeug grundsätzlich in Frage. Eine sinnvolle Verwendung von Handgesten in diesem Kontext bieten jedoch sogenannte präemptive Zeigegesten, die in Kombination mit einer weiteren Bedieneinheit genutzt werden. Neben der Ableitung eines Interaktionswunsches konnte hierdurch auch eine Entkopplung von Anzeige und Bedienung eines Touchscreens erzielt werden. Ob diese Art der Bedienung in einem weniger anspruchsvollen Anwendungsfall systematische Vorteile gegenüber Touch-Interaktion besitzt, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden.

**Indirekte Touchbedienung** leidet ebenfalls unter mangelndem haptischen Feedback. Gerade im Fahrzeug ist daher die Nutzung fühlbarer Bedienelemente vermutlich vorzuziehen. In dieser Arbeit wurde versucht diesem Problem über die Nutzung von Vibrationsfeedback und der Konstruktionsweise (fühlbare Begrenzung) des Touchpads entgegenzuwirken. Zumindest für die Navigation in auf hierarchisch strukturierten Listen basierender Menüs konnte dabei allerdings noch keine mit einem Dreh-Drücksteller vergleichbare Bedienleistung erreicht werden. Für Anwendungsfälle, in denen ein Knopf oder Drehschalter nicht geeignet ist, kann die Nutzung eines Touchpads allerdings interessant sein. Bei der Eingabe von Text konnten Nutzer, die in dem hierfür konzipierten Konzept keinerlei Übung besaßen, mit indirekter Touchbedienung eine mit dem sehr vertrauten Dreh-Drücksteller vergleichbare Schreibleistung erzielen. Eine weitere Herausforderung bei der Verwendung indirekter Touchinteraktion ist die Limitierung auf die beiden verfügbaren Zustände „Berührung“ und „keine Berührung“. Um den für die Interaktion meist notwendigen dritten Zustand zu realisieren, wurden in dieser Arbeit Annäherungsgesten, das Abheben des Fingers oder die Verwendung einer weiteren Modalität mit der anderen Hand in Betracht gezogen. Annäherungsgesten leiden dabei, zumindest bei vertikaler Anordnung des Touchpads, unter ergonomischen Problemen (unwillkürliches Absenken der Hand bei Annäherung). Möglicherweise auftretende Vibrationen im Fahrzeug können die Hand zusätzlich destabilisieren und so für Ungenauigkeiten bei der Interaktion sorgen. Das Abheben des Fingers als Selektionsmetapher führte, obwohl bei Smartphones sehr gebräuchlich, zu einer vergleichsweise geringen Nutzerakzeptanz. Der Grund hierfür wird in der Entkopplung von Interaktions- und Anzeigeort gesehen. Bessere Ergebnisse wurden in dieser Arbeit mit der Hinzunahme eines Knopfes am Lenkrad gemacht. Dieser wurde mit der anderen Hand bedient und wurde zur expliziten Selektion eines (vorausgewählten) Elements gedrückt.

### 6.2.5 Anwendungsfälle

Grundsätzlich gilt für die Datenbrille, genauso wie für das HUD, dass besondere Sorgfalt bei der Auswahl und Anpassung des darzustellenden Anwendungsfalls aufgewendet werden muss. Gerade bei interaktiven Konzepten sollte keineswegs die komplette Funktionalität aktueller Systeme, die normalerweise über einen Dreh-Drücksteller und das CID bedient werden, für die Datenbrille übernommen werden. Stattdessen sollten die Vorteile einer Datenbrille bewusst genutzt werden. So kann die ständige Präsenz kopfstabiler Anzeigen im Blickfeld des Fahrers durchaus negative Effekte haben. Durch eine Studie zur Darstellung von Warnungen konnte in dieser Arbeit allerdings gezeigt werden, dass sich diese Eigenschaft auch positiv nutzen lassen kann. Auch für die Bedienung interaktiver Funktionen kann sich die Datenbrille eignen. So kann die Datenbrille beispielsweise als

zusätzliche Ausgabemodalität genutzt werden, um eine rasche Bedienung mit minimierter Blickabwendung zu ermöglichen. Hierzu wurde in dieser Arbeit ein Konzept vorgestellt, welches einen schnellen Direkteinstieg in häufig während der Fahrt genutzte Funktionen ermöglicht.

Für jeden Anwendungsfall sollte auch bei der Entwicklungen von Anwendungen für die Datenbrille möglichst früh für eine prototypische Darstellung gesorgt werden. So können Nutzen und Risiken abgeschätzt, Zielplattformen bestimmt und Nutzer früh in den Entwicklungsprozess miteinbezogen werden. Ein erster Vorschlag für entsprechende Werkzeuge wurde in dieser Arbeit gemacht.

## 6.2.6 Fazit

In dieser Arbeit wurden Vor- und Nachteile kopf- und fahrzeugstabiler Anzeigen auf einer Datenbrille identifiziert und geeignete Anwendungsfälle für beide Anzeigevarianten vorgestellt. Dabei wurde festgestellt, dass die Datenbrille immer noch nicht die notwendige technologische Reife besitzt, um deren volles Potenzial ausschöpfen zu können. Dass diese technischen Herausforderungen jedoch mindestens abgeschwächt werden können, wurde mit einem neuen Anzeige-konzept gezeigt, welches die traditionelle Unterscheidung zwischen kopf- und fahrzeugstabilen Anzeigen aufbricht und die Kopfdrehung nutzt, um den Fahrer in seiner aktuellen Situation bestmöglich zu unterstützen. Die Bedeutung haptischer Bedienelemente im Fahrzeug wurde auch für die Nutzung mit der Datenbrille bestätigt und Möglichkeiten vorgestellt die Interaktion mit diesen durch die Nutzung von präemptiven Handgesten zu optimieren. So wurden Strategien zur Realisierung unterbrechbarer Interaktionsabläufe formuliert und ein Beitrag zur Erforschung von Gesteninteraktion im Fahrzeug geleistet. In einer Studie zur Interaktion mit kopfstabilen Inhalten während einer teilautomatisierten Fahrt wurde festgestellt, dass hier unter Umständen stärkere Effekte von *Cognitive Capture* auftreten als bei der Verwendung eines HUD.

Außerdem wurden in dieser Dissertation die konzeptionellen Vorteile einer Datenbrille gegenüber einem HUD vorgestellt. Trotz vieler offener Fragen und weiterem Entwicklungsbedarf in den Bereichen Display- und Trackingtechnologie ist der Autor dieser Dissertation daher davon überzeugt, dass die Datenbrille im Fahrzeug zukünftig einen Mehrwert bieten wird. Der Zeitpunkt eines erfolgreichen Einsatzes wird maßgeblich von der Geschwindigkeit des technologischen Fortschritts abhängen: Tracking- und Anzeigetechnik müssen von ausreichender Qualität sein, um Inhalte in jedem Koordinatensystem überzeugend darzustellen. Gleichzeitig muss die resultierende Datenbrille das Gewicht, den Tragekomfort und die Größe einer handelsüblichen Sonnenbrille erreichen.

## 6.3 Ausblick

Bei der Frage nach künftigen Forschungsrichtungen gibt es neben dem offensichtlichen Bedarf von Weiterentwicklungen in den Bereichen der Display- (Ergonomie, Größe des Anzeigebereichs) und Trackingtechnologie (Latenz, Jitter) auch weitere Fragen bezüglich entsprechender Anzeige- und Bedienkonzepte zu klären. Bei den für diese Dissertation

durchgeführten Studien wurden nicht nur Forschungsfragen beantwortet, sondern teilweise auch Effekte beobachtet, deren vollständige Klärung in weiteren Studien erfolgen muss. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten dieser Entwicklungsfelder nochmals aufgegriffen und mögliche Anschlussfragestellungen diskutiert.

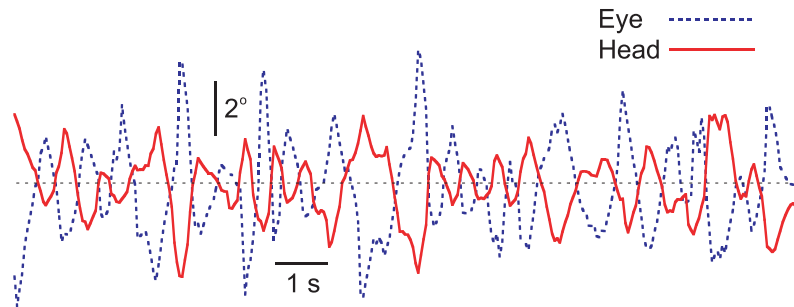
In einem Versuch dieser Arbeit (Abschnitt 5.4) wurde während der Interaktion mit einer Nebenaufgabe eine verlangsamte Reaktion auf ein unvorhergesehenes Ereignis festgestellt. Diese wurde mit einer gesteigerten **Cognitive Capture** bei der Verwendung kopfstabiler Anzeigen im Vergleich zur Anzeige in einem HUD in Zusammenhang gebracht. Der Effekt konnte jedoch nur ein einziges Mal in einer sehr spezifischen Fahrumgebung (assistierte Fahrt) und einer extrem beanspruchenden Sekundäraufgabe beobachtet werden. Da zudem die Ursachen hierfür nicht geklärt sind, sollten hier weitere Untersuchungen stattfinden. Neben der Frage, ob die Beobachtung reproduziert werden kann, sollte insbesondere geklärt werden ob es hier einen systematischen Nachteil kopfstabiler Anzeigen gibt oder die prototypische Brillentechnologie die Ergebnisse beeinflusst hat.

Bei einem Konzept in dieser Arbeit (Abschnitt 4.4) wurde bewusst ein **Bruch mit der bisherigen Differenzierung** zwischen kopf- und fahrzeugstabilen Anzeigen vollzogen. Hierdurch wurden letztlich bestehende Nachteile beider Stabilisierungsformen umgangen und ein neuer Gestaltungsraum für Anzeigen in der Datenbrille eröffnet. Die Hinzunahme weiterer Indikatoren zur Ableitung von Fahrer- und Verkehrssituation, könnte hier weitere Verbesserungen bringen. Die aktuelle Geschwindigkeit, der Lenkwinkel oder die Erfassung der Spurhaltegeüte in Echtzeit würden hier eventuell sinnvoll zu beitragen können. Die Vorteile der Technik im Vergleich zu kopf- und fahrzeugstabilen Anzeigen wurden in dieser Arbeit bereits in einer Studie belegt, allerdings bleibt ein Vergleich mit einer entsprechenden Anzeige auf dem HUD offen.

Für die Evaluation aller Konzepte und Anzeigen wurde in dieser Arbeit ein **statischer Fahrsimulator** genutzt. Für eine höhere externe Validität der Ergebnisse sind jedoch abschließende Untersuchungen in einem Realfahrzeug sinnvoll. Ein weiteres Problem kopfstabiler Anzeigen, das in statischen Simulationsumgebungen nur eine untergeordnete Rolle spielt, könnte hier an Relevanz gewinnen. Durch Fahrzeugvibrationen verursachte, minimale Kopfbewegungen resultieren ständig in einer entsprechenden Verschiebung des Anzeigebereichs gegenüber den Referenzpunkten in der Umgebung. Während das menschliche Auge diese bei stationär verbauten Displays sehr gut durch entsprechende (vestibulare) Augenbewegungen ausgleichen kann (siehe Abbildung 6.1), entfällt diese Möglichkeit in der Datenbrille. Hier müsste ein Bildstabilisator, wie er auch in vielen Digitalkameras zum Einsatz kommt, um ein Verwackeln des Bildes zu verhindern, in die Datenbrille integriert werden.

Das hier oft vorausgesetzte, jedoch maximal mit subjektiven Daten belegte, verbesserte Blickverhalten sollte ebenfalls überprüft werden. Hierzu müssen jedoch noch geeignete Messmethoden entwickelt werden (Vergleiche Kapitel 2.1.5).

Einige Aspekte des Themas konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht werden, sollten jedoch in künftigen Arbeiten ebenfalls Beachtung finden. Hierzu gehören beispielsweise Eigenschaften, die implizit aus der Konstruktionsweise der Datenbrille resultieren, die Wahrnehmung der dargestellten Inhalte jedoch ebenfalls beeinflussen dürften. Die in der Datenbrille verbaute Spiegel- und Linsenkonstruktion gibt die *Distanz* vor, in der die Anzeigen vor dem Nutzer erscheinen. Diese betrug bei allen hier vorgestellten Pro-



**Abbildung 6.1:** Kopf- und (vestibulare) Augenbewegungen während des Autofahrens. Abbildung aus [95].

jekten etwa drei Meter, was den Vergleich mit entsprechenden HUD-Aufbauten vereinfacht und aufgrund des geringen Fokussierungsaufwands auch eine sinnvolle Entfernung bei der Nutzung während der Fahrt ist. In einigen Situationen, etwa wenn Elemente des Fahrzeuginnenraums mit virtueller Information überlagert werden soll, ist die Projektionsdistanz jedoch vermutlich geringer zu wählen. Potenzielle Effekte, wie zum Beispiel eine damit assoziierte *Inattentional Blindness* (siehe Kapitel 4.3), sollten näher untersucht und Strategien zum Umgang mit dieser Problematik erarbeitet werden. Für die exakte Positionierung objektreferenzierter Anzeigen, beispielsweise zur Markierung von Fahrspuren, Straßenschildern oder anderen Fahrzeugen in unterschiedlichen Distanzen könnte die Hinzunahme von *Stereoskopie* hilfreich sein. Grundsätzlich konnte in dieser Arbeit dem Bereich der objektreferenzierten Überlagerung von Elementen außer- und innerhalb des Fahrzeugs im Sinne einer *Augmented Reality* in dieser Arbeit keine Beachtung geschenkt werden. Hier sollten ebenfalls, auch für das HUD, mehr Erkenntnisse über Nutzen und Herausforderungen dieser Technik im Fahrzeug gewonnen werden.

# LITERATUR

- [1] M. Ablassmeier, T. Poitschke, F. Wallhoff, K. Bengler und G. Rigoll. Eye Gaze Studies Comparing Head-up and Head-down Displays in Vehicles. In: *International Conference on Multimedia and Expo*. IEEE. 2007, S. 2250–2252.
- [2] E. C. Adam. Head-up Displays Versus Helmet-mounted Displays: The Issues. In: *SPIE's International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing*. International Society for Optics und Photonics. 1994, S. 13–21.
- [3] A. Ajanki, M. Billinghamurst, H. Gamper, T. Järvenpää, M. Kandemir, S. Kaski, M. Koskela, M. Kurimo, J. Laaksonen, K. Puolamäki, T. Ruokolainen und T. Tossavainen. An Augmented Reality Interface to Contextual Information. In: *Virtual reality* 15.2-3 (2011), S. 161–173.
- [4] S. Akyol, U. Canzler, K. Bengler und W. H. T. Gesture Control for Use in Automobiles. In: *In IAPR MVA Workshop*. 2000, S. 349–352.
- [5] ART. *ART Smarttrack Overview*. 2013. URL: <http://www.ar-tracking.com/products/tracking-systems/smarttrack/>.
- [6] AT&T. *Commuter Survey, durchgeführt von ResearchNow*. 2013. URL: [http://www.att.com/Common/about\\_us/pdf/twd\\_commutor\\_survey.pdf](http://www.att.com/Common/about_us/pdf/twd_commutor_survey.pdf).
- [7] R. Azuma. Tracking Requirements for Augmented Reality. In: *Communications of the ACM* 36.7 (1993), S. 50–51.
- [8] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier und B. MacIntyre. Recent Advances in Augmented Reality. In: *Computer Graphics and Applications* 21.6 (2001), S. 34–47.
- [9] R. Azuma und G. Bishop. Improving Static and Dynamic Registration in an Optical See-through HMD. In: *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. ACM. 1994, S. 197–204.
- [10] R. T. Azuma. A Survey of Augmented Reality. In: *Presence* 6.4 (1997), S. 355–385.
- [11] K. M. Bach, M. G. Jæger, M. B. Skov und N. G. Thomassen. You Can Touch, but You Can't Look: Interacting with In-vehicle Systems. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '08. ACM, 2008, S. 1139–1148.
- [12] R. E. Bailey, J. J. Arthur III und S. P. Williams. Latency Requirements for Head-worn Display S/EVS Applications. In: *Defense and Security*. International Society for Optics und Photonics. 2004, S. 98–109.

- [13] M. Baskinger. Pencils Before Pixels: A Primer in Hand-generated Sketching. In: *Interactions* 15.2 (2008), S. 28–36.
- [14] M. Bayly, K. L. Young und M. A. Regan. 12 Sources of Distraction Inside the Vehicle and Their Effects on Driving Performance. In: *Driver distraction: Theory, Effects and Mitigation* (2008), S. 191–213.
- [15] N. Beckers, S. Schreiner, P. Bertrand, B. Reimer, B. Mehler, D. Munger und J. Dobres. Comparing the Demands of Destination Entry Using Google Glass and the Samsung Galaxy S4. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Bd. 58. 1. SAGE Publications. 2014, S. 2156–2160.
- [16] M. Billinghurst, J. Bowskill, M. Jessop und J. Morphett. A wearable spatial conferencing space. In: *Second International Symposium on Wearable Computers*. IEEE. 1998, S. 76–83.
- [17] R. Blake. What Can Be "Perceived" in the Absence of Visual Awareness? In: *Current Directions in Psychological Science* (1997), S. 157–162.
- [18] E. Blana. *Driving Simulator Validation Studies: A Literature Review*. Working Paper 480. 1996.
- [19] BMW. *BMW Head-Up Display*. 2014. URL: <http://www.bmw.de/de/footer/publications-links/technology-guide/head-up-display.html>.
- [20] T. Bock, M. Maurer und G. Farber. Vehicle in the Loop (VIL) – A New Simulator Set-up for Testing Advanced Driving Assistance Systems. In: *Driving Simulation Conference, North America 2007 (DSC-NA 2007)*. National Advanced Driving Simulator, 2007.
- [21] J. Brooke. SUS – A Quick and Dirty Usability Scale. In: *Usability Evaluation in Industry* (1996), S. 189–194.
- [22] K. A. Brookhuis, D. D. Waard und S. Fairclough. Criteria for driver impairment. In: *Ergonomics* 46.5 (2003), S. 433–445.
- [23] N. Broy, S. Schneegass, F. Alt und A. Schmidt. Framebox and Mirrorbox: Tools and Guidelines to Support Designers in Prototyping Interfaces for 3D Displays. In: *Proceedings of the 32nd annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 2014, S. 2037–2046.
- [24] V. Buchmann, S. Violich, M. Billinghurst und A. Cockburn. FingARtips: Gesture Based Direct Manipulation in Augmented Reality. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia*. ACM. 2004, S. 212–221.
- [25] W. Buxton. A Three-state Model of Graphical Input. In: *Proceedings of the IFIP TC13 Third International Conference on Human-Computer Interaction*. INTERACT '90. Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands: North-Holland Publishing Co., 1990, S. 449–456.
- [26] T. Caudell und D. Mizell. Augmented reality: An Application of Heads-up Display Technology to Manual Manufacturing Processes. In: *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*. Bd. ii. Jan. 1992, S. 659–669.

- [27] L.-W. Chan, H.-S. Kao, M. Y. Chen, M.-S. Lee, J. Hsu und Y.-P. Hung. Touching the Void: Direct-touch Interaction for Intangible Displays. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 2010, S. 2625–2634.
- [28] R. Dachsel und A. Hübner. Three-dimensional Menus: A Survey and Taxonomy. In: *Computers & Graphics* 31.1 (2007), S. 53–65.
- [29] Daimler. *Head-up-Display: Infos im Focus*. 2014. URL: <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-1642522-49-1679534-1-0-0-0-0-0-0-0-0-0-1-0-0-0-0-0.html>.
- [30] C. Dicke, G. Jakus, S. Tomazic und J. Sodnik. On the Evaluation of Auditory and Head-up Displays While Driving. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*. 2012, S. 200–203.
- [31] A. Dix. *Human-computer Interaction*. Springer, 2009.
- [32] T. Döring, D. Kern, P. Marshall, M. Pfeiffer, J. Schöning, V. Gruhn und A. Schmidt. Gestural Interaction on the Steering Wheel: Reducing the Visual Demand. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 2011, S. 483–492.
- [33] A. Doshi und M. M. Trivedi. On the Roles of Eye Gaze and Head Dynamics in Predicting Driver’s Intent to Change Lanes. In: *Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10.3 (2009), S. 453–462.
- [34] H. Drewes und A. Schmidt. “Interacting with the Computer Using Gaze Gestures”. In: *Human-Computer Interaction – INTERACT 2007*. Springer, 2007, S. 475–488.
- [35] H. J. Dudfield, T. D. Hardiman und S. J. Selcon. Human Factors Issues in the Design of Helmet-mounted Displays. In: *SPIE’s 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual Use Photonics*. International Society for Optics und Photonics. 1995, S. 132–141.
- [36] M. Dupuis, M. Strobl und H. Grezlikowski. OpenDRIVE 2010 and Beyond—Status and Future of the de facto Standard for the Description of Road Networks. In: *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC Europe 2010*. 2010, S. 231–242.
- [37] R. Ecker. “Der Verteilte Fahrerinteraktionsraum”. Diss. LMU, 2010.
- [38] R. Ecker, V. Broy, A. Butz und A. De Luca. pieTouch: A Direct Touch Gesture Interface for Interacting with In-vehicle Information Systems. In: *Proceedings of the 11th international Conference on Human-Computer interaction with Mobile Devices and Services*. MobileHCI ’09. ACM. 2009, 22:1–22:10.
- [39] M. R. Endsley. Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT). In: *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference*. IEEE. 1988, S. 789–795.
- [40] J. Engström, E. Johansson und J. Östlund. Effects of Visual and Cognitive Load in Real and Simulated Motorway Driving. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 8.2 (2005), S. 97–120.

- [41] B. M. Ens, R. Finnegan und P. P. Irani. The Personal Cockpit: A Spatial Interface for Effective Task Switching on Head-worn Displays. In: *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems*. ACM. 2014, S. 3171–3180.
- [42] S. Feiner, B. MacIntyre, T. Höllerer und A. Webster. A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment. In: *Personal Technologies* 1.4 (1997), S. 208–217.
- [43] P. Fite-Georgel. Is There a Reality in Industrial Augmented Reality? In: *10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. Okt. 2011, S. 201–210.
- [44] D. C. Foyle, R. S. McCann, B. D. Sanford und M. F. Schwirzke. Attentional Effects with Superimposed Symbolology: Implications for Head-up Displays (HUD). In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Bd. 37. 19. SAGE Publications. 1993, S. 1340–1344.
- [45] D. C. Foyle, B. D. Sanford und R. S. Mccann. Attentional Issues in Superimposed Flight Symbolology. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Aviation Psychology*. NASA, United States, 1991, S. 577–582.
- [46] G. Geiser. Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. In: *ATZ. Automobiltechnische Zeitschrift* 87.2 (1985), S. 77–84.
- [47] R. Gengenbach. *Fahrerverhalten im Pkw mit Head-Up-Display: Gewöhnung und Visuelle Aufmerksamkeit*. Fortschritt-Berichte VDI / Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik: 330. VDI-Verlag, 1997.
- [48] K. W. Gish und L. Staplin. *Human Factors Aspects of Using Head Up Displays in Automobiles: A Review of the Literature*. 1995.
- [49] P. Green. *Measures and Methods Used to Assess the Safety and Usability of Driver Information Systems*. Techn. Ber. Federal Highway Administration, 1995.
- [50] P. Green, B. Lin und T. Bagian. *Driver Workload as a Function of Road Geometry: A Pilot Experiment*. Techn. Ber. GLCTTR 22-91/01. Great Lakes Center for Truck and Transit Research, 1994.
- [51] J. Grosjean, J.-M. Burkhardt, S. Coquillart und P. Richard. Evaluation of the Command and Control Cube. In: *Fourth IEEE International Conference on Multimodal Interfaces*. IEEE. 2002, S. 473–478.
- [52] D. F.-T. W. Group u. a. Statement of Principles, Criteria and Verification Procedures on Driver Interactions with Advanced In-vehicle Information and Communication Systems. In: *Alliance of Automotive Manufacturers* (2002).
- [53] L. Hagen, M. Brown, C. Herdman und D. Bleichman. The Costs and Benefits of Head-Up Displays (HUDs) in Motor Vehicles. In: *13th International Symposium on Aviation Psychology*. 2005, S. 285–288.
- [54] A Hamish Jamson und N. Merat. Surrogate In-vehicle Information Systems and Driver Behaviour: Effects of Visual and Cognitive Load in Simulated Rural Driving. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 8.2 (2005), S. 79–96.



- [55] S. G. Hart. NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Bd. 50. 9. Sage Publications. 2006, S. 904–908.
- [56] S. G. Hart und L. E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: *Advances in Psychology* 52 (1988), S. 139–183.
- [57] C. Harvey, N. A. Stanton, C. A. Pickering, M. McDonald und P. Zheng. To Twist or Poke? A Method for Identifying Usability Issues with the Rotary Controller and Touch Screen for Control of In-vehicle Information Systems. In: *Ergonomics* 54.7 (2011), S. 609–625.
- [58] C. M. Herdman, K. R. Johannsdottir, J. Armstrong, J. Jarmasz, J.-A. LeFevre und F. Lichacz. Mixed-Up But Flyable: HMDs with Aircraft- and Head-Referenced Symbolology. In: *Third International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Aerospace and Transportation Systems*. Ashgate Publishing Limited, 2001, S. 73–79.
- [59] T. Hollerer, S. Feiner und J. Pavlik. Situated Documentaries: Embedding Multimedia Presentations in the Real World. In: *The Third International Symposium on Wearable Computers*. IEEE. 1999, S. 79–86.
- [60] R. L. Holloway. “Registration Errors in Augmented Reality Systems”. Diss. Chapel Hill University of North Carolina, 1995.
- [61] W. J. Horrey, A. L. Alexander und C. D. Wickens. Does Workload Modulate the Effects of In-vehicle Display Location on Concurrent Driving and Side Task Performance. In: *Driving Simulation Conference North America, Dearborn, Michigan*. National Advanced Driving Simulator, 2003.
- [62] W. J. Horrey und C. D. Wickens. Driving and Side Task Performance: The Effects of Display Clutter, Separation and Modality. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 46.4 (2004), S. 611–624.
- [63] W. J. Horrey, C. D. Wickens und A. L. Alexander. The Effects of Head-up Display Clutter and In-vehicle Display Separation on Concurrent Driving Performance. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Bd. 47. 16. SAGE Publications. 2003, S. 1880–1884.
- [64] W. J. Horrey, C. D. Wickens und K. P. Consalus. Modeling Drivers’ Visual Attention Allocation while Interacting with In-vehicle Technologies. In: *Journal of Experimental Psychology* 12.2 (2006), S. 67–78.
- [65] B. Israel. “Potenziale eines Kontaktanalogen Head-up Displays für den Serieneinsatz”. Diss. Technische Universität München, 2013.
- [66] B. Israel, M. Seitz, B. Senner und H. Bubb. Kontaktanaloge Anzeigen für ACC–im Zielkonflikt zwischen Stimulation und Ablenkung. In: *4. Tagung Fahrerassistenz* (2010).
- [67] R. J. Jacob. Eye Movement-based Human-computer Interaction Techniques: Toward Non-command Interfaces. In: *Advances in human-computer interaction* 4 (1993), S. 151–190.

- [68] M. G. Jæger, M. B. Skov, N. G. Thomassen u. a. You Can Touch, But You Can't Look: Interacting with In-vehicle Systems. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 2008, S. 1139–1148.
- [69] S. Jamson, R. Batley, V. Portouli, V. Papakostopoulos, A. Tapani, J. Lundgren, Y. Huang, E. Hollnagel und W. Janssen. Obtaining the Functions Describing the Relations between Behaviour and Risk. In: *AIDE Deliverable 2.1* (2006).
- [70] J. C. Jenkins. Development of Helmet-mounted Display Symbology for Use as a Primary Flight Reference. In: *AeroSense 2003*. International Society for Optics und Photonics. 2003, S. 333–345.
- [71] H. Kato und M. Billinghurst. Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System. In: *2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality*. IEEE. 1999, S. 85–94.
- [72] K. Keller und D. Colucci. Perception in HMDs: What Is It in Head-mounted Displays (HMDs) That Really Make Them All so Terrible? In: *Aerospace/Defense Sensing and Controls*. International Society for Optics und Photonics. 1998, S. 46–53.
- [73] R. J. Kiefer. Quantifying Head-up Display (HUD) Pedestrian Detection Benefits for Older Drivers. In: *Proceedings of the 16th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*. 1998, S. 428–437.
- [74] K. Kimura, A. Nakagoshi und H. Kanamori. Estimation of Driver Inattention to Forward Objects Using Facial Direction with Application to Forward Collision Avoidance Systems. In: *Proceedings of the Fourth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. 2007, S. 473–480.
- [75] S. G. Klauer, F. Guo, J. Sudweeks und T. A. Dingus. *An Analysis of Driver Inattention Using a Case-crossover Approach on 100-Car Data: Final Report*. Techn. Ber. 2010.
- [76] M. Kolsch, R. Bane, T. Hollerer und M. Turk. Multimodal Interaction with a Wearable Augmented Reality System. In: *Computer Graphics and Applications, IEEE* 26.3 (2006), S. 62–71.
- [77] R. Kooper und B. MacIntyre. Browsing the Real-world Wide Web: Maintaining Awareness of Virtual Information in an AR Information Space. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 16.3 (2003), S. 425–446.
- [78] B. Kress und T. Starner. A Review of Head-mounted Displays (HMD) Technologies and Applications for Consumer Electronics. In: *SPIE Defense, Security, and Sensing*. International Society for Optics und Photonics. 2013, 87200A–87200A.
- [79] F. Laquai, M. Ablassmeier, T. Poitschke und G. Rigoll. “Using 3D Touch Interaction for a Multimodal Zoomable User Interface”. In: *Human Interface and the Management of Information. Designing Information Environments*. Bd. 5617. Springer, 2009, S. 543–552.

- [80] R. S. Laramée und C. Ware. Rivalry and Interference with a Head-mounted Display. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 9.3 (2002), S. 238–251.
- [81] Y. Laschinsky, K. von Neumann-Cosel, M. Gonter, C. Wegwerth, R. Dubitzky und A. Knoll. Evaluation of an Active Safety Light Using Virtual Test Drive within Vehicle in the Loop. In: *International Conference on Industrial Technology*. IEEE. 2010, S. 1119–1112.
- [82] F. Lauber und A. Butz. Are HMDs the better HUDs? In: *International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. Okt. 2013, S. 267–268.
- [83] F. Lauber, C. Böttcher und A. Butz. PapAR: Paper Prototyping for Augmented Reality. In: *Adjunct Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. AutomotiveUI '14. ACM, 2014, S. 1–6.
- [84] F. Lauber, C. Böttcher und A. Butz. You've Got the Look: Visualizing Infotainment Shortcuts in Head-Mounted Displays. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. AutomotiveUI '14. ACM, 2014, S. 1–8.
- [85] F. Lauber und A. Butz. In-your-face, Yet Unseen? Improving Head-stabilized Warnings to Reduce Reaction Time. In: *CHI '14: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2014, S. 3201–3204.
- [86] F. Lauber und A. Butz. View Management for Driver Assistance in an HMD. In: *International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. Okt. 2013, S. 1–6.
- [87] F. Lauber, S. Cook und A. Butz. Content Destabilization for Head-Mounted Displays. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '15. New York, NY, USA: ACM, 2015, S. 2139–2142.
- [88] F. Lauber, A. Follmann und A. Butz. What You See is What You Touch: Visualizing Touch Screen Interaction in the Head-up Display. In: *DIS '14: Proceedings of the 2014 conference on Designing interactive systems*. Vancouver, BC, Canada: ACM, 2014, S. 171–180.
- [89] H. Lee, D. Kim und W. Woo. Graphical Menus Using a Mobile Phone for Wearable AR Systems. In: *International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality (ISUVR)*. IEEE. 2011, S. 55–58.
- [90] J. D. Lee, B. Caven, S. Haake und T. L. Brown. Speech-based Interaction with In-vehicle Computers: The Effect of Speech-based E-mail on Drivers' Attention to the Roadway. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 43.4 (2001), S. 631–640.
- [91] J. D. Lee, K. L. Young und M. A. Regan. Defining Driver Distraction. In: *Driver Distraction: Theory, Effects and Mitigation* (2008), S. 31–40.
- [92] H. Li, X. Zhang, G. Shi, H. Qu, Y. Wu und J. Zhang. Review and Analysis of Avionic Helmet-mounted Displays. In: *Optical Engineering* 52.11 (2013), S. 110901–110901.

- [93] M. Liebner, C. Ruhhammer, F. Klanner und C. Stiller. Generic Driver Intent Inference Based on Parametric Models. In: *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp.(IV)*. IEEE, 2013, S. 268–275.
- [94] L. Ltd. *Lumus Consumer Products*. URL: [http://www.lumus-optical.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=9&Itemid=15](http://www.lumus-optical.com/index.php?option=com_content&task=view&id=9&Itemid=15).
- [95] H. G. MacDougall und S. T. Moore. Functional Assessment of Head-Eye Coordination During Vehicle Operation. In: *Optometry & Vision Science* 82.8 (2005), S. 706–715.
- [96] I. S. MacKenzie und C. Ware. Lag as a Determinant of Human Performance in Interactive Systems. In: *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 conference on Human factors in computing systems*. ACM. 1993, S. 488–493.
- [97] K. Mania, B. D. Adelstein, S. R. Ellis und M. I. Hill. Perceptual Sensitivity to Head Tracking Latency in Virtual Environments with Varying Degrees of Scene Complexity. In: *Proceedings of the 1st Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. ACM. 2004, S. 39–47.
- [98] M. Martens und W. Van Winsum. Effects of Speech Versus Tactile Driver Support Messages on Driving Behavior and Workload. In: *Proceedings of 17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles* (2001).
- [99] M. Martens und W. Van Winsum. Measuring Distraction: The Peripheral Detection Task. In: *TNO Human Factors, Soesterberg, The Netherlands* (2000).
- [100] S. Martin, A. Tawari, E. Murphy-Chutorian, S. Y. Cheng und M. Trivedi. On the Design and Evaluation of Robust Head Pose for Visual User Interfaces: Algorithms, Databases and Comparisons. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. ACM. 2012, S. 149–154.
- [101] S. Martin, A. Tawari und M. M. Trivedi. Monitoring Head Dynamics for Driver Assistance Systems: A Multi-Perspective Approach. In: *16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. 2013, S. 2286–2291.
- [102] E. Matin. Saccadic Suppression: A Review and an Analysis. In: *Psychological Bulletin* 81.12 (1974), S. 899–917.
- [103] S. Mattes und A. Hallén. Surrogate Distraction Measurement Techniques: The Lane Change Test. In: *Driver distraction: Theory, Effects and Mitigation* (2009), S. 107–121.
- [104] R. S. McCann, D. C. Foyle und J. C. Johnston. Attentional Limitations with Head-up Displays. In: *Proceedings of the Seventh International Symposium on Aviation Psychology*. NASA, 1993, S. 70–75.
- [105] I. McManus. Eye-dominance, Writing hand and Throwing Hand. In: *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition* 4.2 (1999), S. 173–192.
- [106] J. E. Melzer. Head Mounted Displays. In: *Digital Avionics Handbook*. Hrsg. von C. R. Spitzer. CRC Press, 2000.

- [107] J. E. Melzer, F. T. Brozoski, T. R. Letowski, T. H. Harding und C. E. Rash. Guidelines for HMD Design. In: *Helmet-Mounted Displays: Sensation, Perception and Cognition Issues* (2009), S. 805–848.
- [108] J. Migozzi. *Optical Device Enabling the Introduction of a Collimated Image in an Observer's Field of Vision*. US Patent 5,076,664. Dez. 1991.
- [109] P. Milgram und F. Kishino. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. In: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77.12 (1994), S. 1321–1329.
- [110] N. Miličić. “Sichere und Ergonomische Nutzung von Head-Up Displays im Fahrzeug”. Diss. Technische Universität München, 2010.
- [111] N. Miličić und T. Lindberg. Menu Interaction in Head-up Displays. In: *Human Factors, Security and Safety*. Hrsg. von D. De Waard, H. Godthelp, F. Kooi und K. Brookhuis. Shaker Publishing, 2009, S. 271–284.
- [112] M. Mon-Williams, J. P. Warm und S. Rushton. Binocular Vision in a Virtual World: Visual Deficits Following the Wearing of a Head-mounted Display. In: *Ophthalmic and Physiological Optics* 13.4 (1993), S. 387–391.
- [113] National Highway Traffic Safety Administration. Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines for In-Vehicle Electronic Devices. In: *Washington, DC: US Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Docket No. NHTSA-2010-0053* (2013).
- [114] J. Nielsen. The Usability Engineering Life Cycle. In: *Computer* 25.3 (1992), S. 12–22.
- [115] S. Nilsson, T. Gustafsson und P. Carleberg. Hands Free Interaction with Virtual Information in a Real Environment: Eye Gaze as an Interaction Tool in an Augmented Reality System. In: *PsychNology Journal* 7.2 (2009). Retrieved from [www.psychnology.org](http://www.psychnology.org), S. 175–196.
- [116] D. I. für Normung. *Ergonomic Aspects of Transport Information and Control Systems - Specifications and Compliance Procedures for In-vehicle Visual Presentation*. Ref.No.: DIN EN ISO 15008:2003-10. 2003.
- [117] H. Pashler. Dual-task Interference in Simple Tasks: Data and Theory. In: *Psychological Bulletin* 116.2 (1994), S. 220–244.
- [118] R. Patterson, M. D. Winterbottom und B. J. Pierce. Perceptual Issues in the Use of Head-mounted Visual Displays. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 48.3 (2006), S. 555–573.
- [119] A. Pauzie. A Method to Assess the Driver Mental Workload: The Driving Activity Load Index (DALI). In: *IET Intelligent Transport Systems* 2.4 (2008), S. 315–322.
- [120] E. Peli. Visual Issues in the Use of a Head-mounted Monocular Display. In: *Optical Engineering* 29.8 (1990), S. 883–892.
- [121] C. A. Pickering, K. J. Burnham und M. J. Richardson. A Research Study of Hand Gesture Recognition Technologies and Applications for Human Vehicle Interaction. In: *3rd Institution of Engineering and Technology Conference on Automotive Electronics*. IET, 2007, S. 1–15.

- [122] W. Piekarski und B. H. Thomas. Tinmith-metro: New Outdoor Techniques for Creating City Models with an Augmented Reality Wearable Computer. In: *Proceedings of the Fifth International Symposium on Wearable Computers*. IEEE, 2001, S. 31–38.
- [123] I. Poupyrev, D. Tan, M. Billinghurst, H. Kato, H. Regenbrecht und N. Tetsutani. Tiles: A Mixed Reality Authoring Interface. In: *INTERACT – Conference on Human Computer Interaction*. IOS Press, 2001, S. 334–341.
- [124] F. Praschak. “Entwicklung und Evaluation eines Interaktionskonzepts für halbtransparente Displays im Automobil”. Unter Anleitung von Felix Lauber. Jan. 2015.
- [125] L. Prinzel und M. Risser. Head-up Displays and Attention Capture. In: *NASA Technical Memorandum* (2004).
- [126] A. Rahman, J. Saboune und A. El Saddik. Motion-path Based in Car Gesture Control of the Multimedia Devices. In: *Proceedings of the First ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications*. ACM. 2011, S. 69–76.
- [127] C. E. Rash, R. W. Verona und J. S. Crowley. Human Factors and Safety Considerations of Night-vision Systems Flight Using Thermal Imaging Systems. In: *Proc. SPIE* 1290 (1990), S. 142–164.
- [128] N. Rauch, A. Kaussner, H.-P. Krüger, S. Boverie und F. Flemisch. The Importance of Driver State Assessment Within Highly Automated Vehicles. In: *16th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. ITS America, 2009.
- [129] K. Rayner. Eye Movements in Reading and Information Processing: 20 Years of Research. In: *Psychological bulletin* 124.3 (1998), S. 372–422.
- [130] G. Reitmayr und D. Schmalstieg. Collaborative Augmented Reality for Outdoor Navigation and Information Browsing. In: *Proceedings of the Second Symposium on Location Based Services and TeleCartography*. TU Wien, 2004, S. 53–62.
- [131] G. Reitmayr und D. Schmalstieg. Mobile Collaborative Augmented Reality. In: *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*. IEEE, 2001, S. 114–123.
- [132] J. Rekimoto, Y. Ayatsuka und K. Hayashi. Augment-able Reality: Situated Communication through Physical and Digital Spaces. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Wearable Computers*. IEEE. 1998, S. 68–75.
- [133] J. Rekimoto und K. Nagao. The World Through the Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments. In: *Proceedings of the 8th Annual ACM Symposium on User Interface and Software Technology*. ACM. 1995, S. 29–36.
- [134] R. A. Rensink, J. K. O’Regan und J. J. Clark. To See or Not to See: The Need for Attention to Perceive Changes in Scenes. In: *Psychological science* 8.5 (1997), S. 368–373.

- [135] H. Richter, R. Ecker, C. Deisler und A. Butz. HapTouch and the 2+1 State Model: Potentials of Haptic Feedback on Touch Based In-vehicle Information Systems. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. AutomotiveUI '10. ACM, 2010, S. 72–79.
- [136] A. Riener. Gestural Interaction in Vehicular Applications. In: *Computer* 45.4 (2012), S. 42–47.
- [137] C. Roe, T. Brown und G. Watson. Factors Associated with Simulator Sickness in a High-Fidelity Simulator. In: *Driving Simulation Conference, North America 2007 (DSC-NA 2007)*. National Advanced Driving Simulator, 2007.
- [138] W. A. Rogers, A. D. Fisk, A. C. McLaughlin und R. Pak. Touch a Screen or Turn a Knob: Choosing the Best Device for the Job. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 47.2 (2005), S. 271–288.
- [139] S. Ron und A. Berthoz. Eye and Head Coupled and Dissociated Movements During Orientation to a Double Step Visual Target Displacement. In: *Experimental brain research* 85.1 (1991), S. 196–207.
- [140] L. B. Rosenberg. *The Use of Virtual Fixtures as Perceptual Overlays to Enhance Operator Performance in Remote Environments*. Techn. Ber. ADA292450. 1992.
- [141] S. Rümelin, F. Brudy und A. Butz. *Up And Down And Along: How We Interact With Curvature*. <http://displayworkshop.media.mit.edu/CHI2013/>. 2013.
- [142] S. Rümelin und A. Butz. How To Make Large Touch Screens Usable While Driving. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. AutomotiveUI '13. ACM, 2013.
- [143] H. Salzmann und B. Froehlich. The Two-user Seating Buck: Enabling Face-to-face Discussions of Novel Car Interface Concepts. In: *Virtual Reality Conference*. IEEE, 2008, S. 75–82.
- [144] N. Sawhney und C. Schmandt. Speaking and Listening on the Run: Design for Wearable Audio Computing. In: *Second International Symposium on Wearable Computers*. IEEE, 1998, S. 108–115.
- [145] B. D. Sawyer, V. S. Finomore, A. A. Calvo und P. Hancock. Google Glass A Driver Distraction Cause or Cure? In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 56.7 (2014), S. 1307–1321.
- [146] D. Schmalstieg, A. Fuhrmann, G. Hesina, Z. Szalavári, L. M. Encarnação, M. Gervautz und W. Purgathofer. The Studierstube Augmented Reality Project. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 11.1 (2002), S. 33–54.
- [147] A. Schmidt, A. K. Dey, A. L. Kun und W. Spiessl. Automotive User Interfaces: Human Computer Interaction in the Car. In: *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 2010, S. 3177–3180.
- [148] D. Schmidt, F. Block und H. Gellersen. “A Comparison of Direct and Indirect Multi-touch Input for Large Surfaces”. In: *Human-Computer Interaction—INTERACT 2009*. Springer, 2009, S. 582–594.

- [149] M. Schneid. *Entwicklung und Erprobung eines Kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug*. Cuvillier, 2009.
- [150] G. Simon, A. W. Fitzgibbon und A. Zisserman. Markerless Tracking Using Planar Structures in the Scene. In: *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*. IEEE. 2000, S. 120–128.
- [151] C. Snyder. *Paper Prototyping: The Fast and Easy Way to Design and Refine User Interfaces*. Morgan Kaufmann, 2003.
- [152] R. J. Sojourner und J. F. Antin. The Effects of a Simulated Head-up Display Speedometer on Perceptual Task Performance. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 32.3 (1990), S. 329–339.
- [153] R. H. Spector. Visual Fields. In: *Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations*. Hrsg. von H. K. Walker, W. Hall und J. Hurst. 1990, S. 565–572.
- [154] R. Spies, M. Ablaßmeier, H. Bubbs und W. Hamberger. “Augmented Interaction and Visualization in the Automotive Domain”. In: *Human-Computer Interaction. Ambient, Ubiquitous and Intelligent Interaction*. Springer, 2009, S. 211–220.
- [155] A. Sprenger. In-vehicle Displays: Head-up Display Field Tests. In: *Vision in Vehicles* 4 (1993), S. 301–309.
- [156] A. Stevens, A. Quimby, A. Board, T. Kersloot und P. Burns. *Design Guidelines for Safety of In-vehicle Information Systems*. Ref.: PA3721/01. 2002.
- [157] M. Strobl. SPIDER: Das Innovative Software-Framework der BMW Fahrsimulation. In: *VDI-Berichte* (2003), S. 303–320.
- [158] I. E. Sutherland. A Head-mounted Three Dimensional Display. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*. AFIPS '68 (Fall, part I). ACM. 1968, S. 757–764.
- [159] I. E. Sutherland. The Ultimate Display. In: *Proceedings of the International Federation of Information Processing Congress*. 1965, S. 506–508.
- [160] H. Takemura und F. Kishino. Cooperative Work Environment Using Virtual Workspace. In: *Proceedings of the 1992 ACM conference on Computer-supported cooperative work*. ACM. 1992, S. 226–232.
- [161] K. G. Tappey, E. Sivaraj, W.-J. Ardoin, T. Rody und T. K. Ferris. Texting While Driving Using Google Glass. Investigating the Combined Effect of Heads-up Display and Hands-free Input on Driving Safety and Performance. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Bd. 58. 1. SAGE Publications. 2014, S. 2023–2027.
- [162] M. Tönnis, V. Broy und G. Klinker. A Survey of Challenges Related to the Design of 3D User Interfaces for Car Drivers. In: *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*. IEEE. 2006, S. 127–134.
- [163] M. Tönnis, C. Lange und G. Klinker. Visual Longitudinal and Lateral Driving Assistance in the Head-up Display of Cars. In: *6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE. 2007, S. 91–94.



- [164] T. E. Trimble, R. Bishop, J. F. Morgan und M. Blanco. Human Factors Evaluation of Level 2 and Level 3 Automated Driving Concepts: Past Research, State of Automation Technology, and Emerging System Concepts. In: *US Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Report No. DOT HS 812 043* (Juli 2014).
- [165] O. Tsimhoni, P. Green und H. Watanabe. Detecting and Reading Text on HUDs: Effects of Driving Workload and Message Location. In: *11th Annual ITS America Meeting*. Intelligent Transportation Society of America, 2001.
- [166] J. C. Verster und T. Roth. Standard Operation Procedures for Conducting the On-the-road Driving Test and Measurement of the Standard Deviation of Lateral Position (SDLP). In: *International Journal of General Medicine* 4 (2011), S. 359–371.
- [167] M. Ververs Patricia und D. Wickens Christopher. *Conformal Flight Path Symbolology for Head-up Displays: Defining the Distribution of Visual Attention in Three-dimensional Space*. Techn. Ber. ARL-98-5/NASA-98-1. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, Aug. 1998.
- [168] G. Von Noorden und E. Campos. Physiology of the Ocular Movements. In: *Binocular Vision and Ocular Motility* 5 (1996), S. 53–80.
- [169] Vuzix. *Vuzix Star 1200 Manual*. URL: [http://www.vuzix.com/wp-content/uploads/docs/\\_support/Manuals/STAR\\_1200-1200XL\\_User\\_Guide,\\_410PB0020-A.pdf](http://www.vuzix.com/wp-content/uploads/docs/_support/Manuals/STAR_1200-1200XL_User_Guide,_410PB0020-A.pdf).
- [170] D. G. Walshe, E. J. Lewis, S. I. Kim, K. O’Sullivan und B. K. Wiederhold. Exploring the Use of Computer Games and Virtual Reality in Exposure Therapy for Fear of Driving Following a Motor Vehicle Accident. In: *CyberPsychology & Behavior* 6.3 (2003), S. 329–334.
- [171] H. Watanabe, H. Yoo, O. Tsimhoni und P. Green. The Effect of HUD Warning Location on Driver Responses. In: *Sixth World congress on Intelligent Transport Systems, Toronto, Canada*. ITS America, 1999.
- [172] S. White, D. Feng und S. Feiner. Interaction and Presentation Techniques for Shake Menus in Tangible Augmented Reality. In: *8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE. 2009, S. 39–48.
- [173] C. D. Wickens. *Engineering Psychology and Human Performance*. HarperCollins Publishers, 1992.
- [174] C. D. Wickens. Multiple Resources and Performance Prediction. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 3.2 (2002), S. 159–177.
- [175] C. D. Wickens und W. J. Horrey. Models of Attention, Distraction and Highway Hazard Avoidance. In: *Driver distraction: Theory, Effects and Mitigation*. Hrsg. von M. A. Regan, J. D. Lee und K. L. Young. CRC Press, 2008, S. 249–279.
- [176] C. D. Wickens, M. Vincow und M. Yeh. “Design Applications of Visual Spatial Thinking: The Importance of Frame of Reference”. In: *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking*. Hrsg. von A. Miyaki und P. Shah. Cambridge University Press, 2005, S. 383–425.

- [177] A. Wiethoff, H. Schneider, J. K fner, M. Rohs, A. Butz und S. Greenberg. Paperbox: A Toolkit for Exploring Tangible Interaction on Interactive Surfaces. In: *Proceedings of the 9th ACM Conference on Creativity & Cognition*. ACM. 2013, S. 64–73.
- [178] R. W. Wiley. *Visual Acuity and Stereopsis with Night Vision Goggles*. Techn. Ber. DTIC Document. 1989.
- [179] J. M. Wolfe. Guided Search 2.0: A Revised Model of Visual Search. In: *Psychonomic bulletin & review* 1.2 (1994), S. 202–238.
- [180] M. Yeh, C. D. Wickens und F. Seagull. Effects of Frame of Reference and Viewing Condition on Attentional Issues with Helmet Mounted Displays. In: *Proceedings of 2nd Annual FEDLAB Symposium: Advanced Displays and Interactive Displays*. 1998, S. 107–114.
- [181] H. Yoo, O. Tsimhoni, H. Watanabe, P. Green und R. Shah. *Display of HUD Warnings to Drivers: Determining an Optimal Location*. Techn. Ber. University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor MI, 1999.
- [182] K. Young, M. Regan und M. Hammer. Driver Distraction: A Review of the Literature. In: *Distracted driving*. Sydney, NSW: Australasian College of Road Safety (2003).
- [183] K. L. Young, M. A. Regan und J. D. Lee. Measuring the Effects of Driver Distraction: Direct Driving Performance Methods and Measures. In: *Driver Distraction: Theory, Effects and Mitigation* (2009), S. 85–106.
- [184] R. Young. Cognitive Distraction While Driving: A Critical Review of Definitions and Prevalence in Crashes. In: *Journal of Passenger Cars – Electronic and Electrical Systems* (2012), S. 326–342.
- [185] W. Zangemeister und L. Stark. Types of Gaze Movement: Variable Interactions of Eye and Head Movements. In: *Experimental Neurology* 77.3 (1982), S. 563–577.
- [186] F. Zhou, H. B.-L. Duh und M. Billinghurst. Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: A Review of Ten Years of ISMAR. In: *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE Computer Society. 2008, S. 193–202.

## Eidesstattliche Versicherung

(Siehe Promotionsordnung vom 12. Juli 2011, § 8, Abs. 2 Pkt. 5.)

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass die Dissertation von mir selbstständig und ohne unerlaubte Beihilfe angefertigt wurde.

München, den 5. November 2015

Felix Lauber